

Desarrollo de un controlador de lógica difusa para la mejora del comportamiento lateral de un vehículo ferroviario



UNIVERSIDAD CARLOS III DE MADRID

ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA

Autor:

Don Francisco Blanco da Silva

Tutor:

Don Rubén Oliva Domínguez

Cotutora:

Dra. Dña. María Jesús López Boada

Septiembre, 2014

Agradecimientos

A mi familia, especialmente a mis padres, y a mis amigos y amigas, por haber estado ahí siempre.

A mis compañeros de universidad, por todos los buenos y malos momentos pasados juntos.

A mis tutores, en especial a Rubén, por toda la ayuda y atención prestada para realizar este Proyecto.

RESUMEN

El principal objetivo de este Proyecto es el de desarrollar un controlador basado en lógica difusa para la suspensión lateral activa de un vehículo ferroviario.

Para cumplir dicho propósito, se desarrolla un modelo de vehículo ferroviario en Simpack, implementando a su vez en dicho modelo un controlador de la suspensión lateral activa desarrollado en Simulink.

Además, se modeliza un segundo vehículo ferroviario, igual al anterior, pero carente de suspensión lateral activa para utilizarlo como referencia en las simulaciones.

De este modo, se realizan las simulaciones necesarias y se comprueba el correcto funcionamiento del controlador basado en lógica difusa, así como su influencia en la dinámica del vehículo.

ABSTRACT

The main objective of this Project is to develop a controller system based on fuzzy logic for the active lateral suspension of rail vehicle.

To fulfill that purpose, a model of railway vehicle is developed in Simpack, implementing turn on this model a controller of active lateral suspension developed in Simulink.

In addition, a second railway vehicle is developed, same as above, but without active lateral suspension for use as a reference in the simulations.

Thus, the necessary simulations are carried out and the correct operation of the controller based on fuzzy logic and its influence on the dynamics of the vehicle is checked.

ÍNDICE

Capítulo 1. Introducción y objetivos.....	1
1.1 Introducción.....	2
1.2 Objetivos.....	3
1.3 Estructura del proyecto	3
Capítulo 2. Vehículos ferroviarios.....	5
2.1 Elementos de un vehículo ferroviario	6
2.1.1 Caja	7
2.1.1.1 Introducción y tipos de cajas	7
2.1.2 Ruedas	8
2.1.2.1 Introducción y características.....	8
2.1.2.2 Partes de una rueda.....	10
2.1.2.3 Tipos de ruedas.....	10
2.1.2.4 Fabricación de ruedas	12
2.1.3 Ejes.....	13
2.1.3.1 Introducción y características.....	13
2.1.3.2 Partes y geometría de un eje ferroviario	14
2.1.3.3 Materiales empleados en su fabricación	15
2.1.4 Cajas de grasa.....	16
2.1.4.1 Introducción y características.....	16
2.1.4.2 Tipos de cajas de grasa.....	17
2.1.5 Placas de guardia	19
2.1.5.1 Introducción y características.....	19
2.1.6 Elementos de la suspensión	20
2.1.6 .1 Introducción	20
2.1.6.2 Elementos elásticos	20
2.1.7 Bogie	26
2.1.7.1 Introducción y características.....	26
2.1.7.2 Tipos de bogies	28
2.2 Tipos de suspensiones	29
2.2.1 Introducción	29
2.2.2 Suspensión primaria	31
2.2.3 Suspensión secundaria	34
2.3 Tipos de suspensiones: pasivas, activas, y semi activas	34

2.3.1 Suspensiones pasivas.....	35
2.3.2 Suspensiones activas	35
2.3.2.1 Trenes basculantes	36
2.3.2.2 Suspensiones activas secundarias	38
2.3.2.3 Suspensiones activas primarias	42
2.3.3 Suspensiones semi activas	44
Capítulo 3. Lógica difusa y estabilidad lateral de un vehículo ferroviario	47
3.1 Lógica difusa.....	48
3.1.1 Introducción histórica.....	48
3.1.2 Funcionamiento de la lógica difusa	48
3.2 Estabilidad lateral de un vehículo ferroviario	53
3.2.1 Estabilidad lateral en tramos rectos	54
3.2.2 Estabilidad lateral en tramos curvos	59
Capítulo 4. Modelado de un vehículo ferroviario en Simpack	69
4.1 Introducción a los modelos informáticos	70
4.2 Simpack.....	70
4.3 Modelado del vehículo ferroviario.....	71
4.3.1 Pasos previos.....	72
4.3.2 Modelado del eje montado.....	73
4.3.2 Modelado del bogie.....	80
4.3.2 Modelado del vehículo ferrocarril completo	97
4.3.5 Modelado de los elementos adicionales referentes a la suspensión activa lateral ..	102
Capítulo 5. Controlador de lógica difusa.....	111
5.1 Introducción.....	112
5.2 Desarrollo del algoritmo de lógica borrosa mediante Matlab.....	112
5.2 Modelo de algoritmo utilizado y alternativas.....	118
5.3 Configuración del controlador en Simulink	120
Capítulo 6. Simulación y resultados.....	131
6.1 Simulación y obtención de los resultados	132
6.2 Simulaciones realizadas.....	134
6.3 Resultados obtenidos	135
6.3.1 Resultados del vehículo ferroviario provisto de suspensión pasiva.....	136
6.3.2 Resultados del vehículo ferroviario provisto de suspensión activa	140

6.3.3 Comparación entre los resultados obtenidos con suspensión convencional y suspensión activa	144
Capítulo 7. Conclusiones y trabajos futuros	149
7.1 Conclusiones	150
7.2 Trabajos futuros	151
Bibliografía	153

ÍNDICE DE FIGURAS.

<i>Figura 1.1. Vehículo ferroviario de mercancías.</i>	2
<i>Figura 2.1. Esquema distintos tipos de vehículos ferroviarios.</i>	6
<i>Figura 2.2. Caja de un coche.</i>	8
<i>Figura 2.3. Defecto provocado por un plano en una rueda.</i>	9
<i>Figura 2.4. Partes de una rueda de ferrocarril.</i>	10
<i>Figura 2.5. Descripción de una rueda monobloque.</i>	11
<i>Figura 2.6. Descripción de una rueda con centro y bandaje.</i>	11
<i>Figura 2.7. Descripción de una rueda elástica.</i>	12
<i>Figura 2.8. Esquema preciso de un eje ferroviario.</i>	14
<i>Figura 2.9. Despiece caja de grasa.</i>	16
<i>Figura 2.10. Caja de grasa con sensor instalado en la obturación del rodamiento.</i>	18
<i>Figura 2.11. Tipos de rodamientos en las cajas de grasa.</i>	18
<i>Figura 2.12. Esquema de ubicación de la placa de guardia.</i>	20
<i>Figura 2.13. Ballesta.</i>	21
<i>Figura 2.14. Muelles helicoidales.</i>	21
<i>Figura 2.15. Muelle helicoidal de fleje.</i>	22
<i>Figura 2.16. Muelle Belleville.</i>	22
<i>Figura 2.17. Muelle neumático.</i>	23
<i>Figura 2.18. Carga de un muelle neumático en función de los esfuerzos a los que está sometido.</i>	24
<i>Figura 2.19. Muelle elastómero.</i>	25
<i>Figura 2.20. Muelles elastómeros formados por varios elementos.</i>	26
<i>Figura 2.21. Bogie.</i>	27
<i>Figura 2.22. Mejora del confort debida al uso de bogies.</i>	27
<i>Figura 2.23. bogie de dos ejes.</i>	28
<i>Figura 2.24. Bogie de tres ejes.</i>	29
<i>Figura 2.25. Suspensión articulada de ejes convergentes.</i>	30
<i>Figura 2.26. Esfuerzo de convergencia sobre la suspensión.</i>	31
<i>Figura 2.27. Esquema de suspensión primaria y suspensión secundaria.</i>	31
<i>Figura 2.28. Suspensión primaria mediante banda elástica.</i>	32
<i>Figura 2.29. Suspensión primaria mediante fuelles de goma.</i>	32
<i>Figura 2.30. Suspensión primaria mediante muelles helicoidales.</i>	33
<i>Figura 2.31. Suspensión primaria mediante brazo articulado.</i>	33
<i>Figura 2.32. Suspensión primaria mediante balancín entre cajas.</i>	34
<i>Figura 2.33. Esquema general de una suspensión activa.</i>	36
<i>Figura 2.34. Talgo 4 ó Talgo Pendular.</i>	37
<i>Figura 2.35. Esquema tren pendular.</i>	38
<i>Figura 2.36. Configuraciones de actuadores en la suspensión secundaria activa.</i>	39
<i>Figura 2.37. Actuador neumático.</i>	40
<i>Figura 2.38. Tornillo de rodillos y tornillo de bolas.</i>	41
<i>Figura 2.39. Actuador electro-mecánico.</i>	41
<i>Figura 2.40. Configuraciones del actuador para la suspensión primaria.</i>	43
<i>Figura 2.41. Control semi activo y completamente activo.</i>	44
<i>Figura 2.42. Esquema amortiguador basado en electroválvulas.</i>	45
<i>Figura 3.1. Temperatura del agua a la salida del grifo.</i>	49
<i>Figura 3.2. Caudal de agua fría y caliente.</i>	50
<i>Figura 3.3. Asociación de las variables lingüísticas MF y PF con un valor de temperatura del agua de 13°C.</i>	51

Figura 3.4. Modificación de los triángulos de los grupos PCC y MCC.....	51
Figura 3.5. Obtención de la señal de salida.....	52
Figura 3.6. Sistema virtual para la obtención de P.....	52
Figura 3.7. Movimiento de lazo.....	54
Figura 3.8. Ejes de referencia en el eje montado.....	54
Figura 3.9. Esquema de conicidad de un eje montado.....	55
Figura 3.10. Esquema de velocidades de un eje montado en tramo recto.....	56
Figura 3.11. Ecuación sinusoidal de Klingel.....	59
Figura 3.12. Esquema de cotas eje montado.....	60
Figura 3.13. Esquema velocidades de un eje montado en tramo curvo.....	60
Figura 3.14. Esquema de fuerzas en un tramo peraltado.....	63
Figura 4.1. Carpetas que se han de crear.....	73
Figura 4.2. Valores de masa e inercia para el eje montado.....	74
Figura 4.3. Geometría del eje montado.....	75
Figura 4.4. Condiciones de contorno y posición del eje montado.....	76
Figura 4.5. Características de la rueda derecha del eje montado.....	77
Figura 4.6. Creación del archivo \$RWC_FASTSIM.....	78
Figura 4.7. Conjunto eje más rueda derecha.....	79
Figura 4.8. Características de los marcadores sobre las ruedas.....	80
Figura 4.9. Añadir subestructuras al "Search Path".....	81
Figura 4.10. Botón para crear una nueva subestructura.....	81
Figura 4.11. Condiciones de contorno y posición del elemento \$J_WS.....	82
Figura 4.12. Posición de los ejes montados del bogie delantero.....	82
Figura 4.13. Valores de masa e inercia para el bogie.....	83
Figura 4.14. Valores de la geometría del bogie I.....	84
Figura 4.15. Valores de la geometría del bogie II.....	84
Figura 4.16. Condiciones de contorno y posición del bogie.....	85
Figura 4.17. Conjunto bogie mas ejes montados.....	85
Figura 4.18. Características de los resortes de la suspensión primaria.....	87
Figura 4.19. Función de los amortiguadores de la suspensión primaria.....	88
Figura 4.20. Características de los amortiguadores de la suspensión primaria.....	89
Figura 4.21. Valores de masa e inercia para el cabezal fijo del bogie.....	90
Figura 4.22. Geometría del cabezal del bogie.....	90
Figura 4.23. Condiciones de contorno y posición del cabezal del bogie.....	91
Figura 4.24. Conjunto bogie, mas ejes montados, mas cabezal fijo.....	91
Figura 4.25. Características de los resortes de la suspensión secundaria.....	93
Figura 4.26. Función de los amortiguadores de la suspensión secundaria.....	94
Figura 4.27. Configuración de los amortiguadores verticales de la suspensión secundaria.....	94
Figura 4.28. Configuración de los amortiguadores laterales de la suspensión secundaria.....	95
Figura 4.29. Detalle de la colocación de los amortiguadores laterales de la suspensión secundaria.....	95
Figura 4.30. Configuración de los amortiguadores laterales de la suspensión secundaria activa.....	96
Figura 4.31. Características de la barra de torsión.....	96
Figura 4.32. Características del parachoques.....	97
Figura 4.33. Importación de las subestructuras.....	98
Figura 4.34. Modificación de la posición del bogie delantero.....	99
Figura 4.35. Valores de masa, inercia y especificación del centro de gravedad del coche.....	100
Figura 4.36. Características de la geometría del coche.....	100
Figura 4.37. Modificación de los "joints" correspondientes con los cabezales fijos de los bogies.....	101
Figura 4.38. Modificación del "Joint" correspondiente con el coche.....	102
Figura 4.39. Modelado del vehículo ferroviario completo.....	102

Figura 4.40. Dirección de los ejes X y Z en el vehículo ferroviario y localización de los sensores.....	103
Figura 4.41. Alineación lateral del bogie con respecto al coche.....	104
Figura 4.42. Configuración del "Control element" para los sensores de posición.....	105
Figura 4.43. Configuración del "Control element" para los sensores de aceleración.....	106
Figura 4.44. Configuración del "Control element" referido al controlador de lógica difusa.....	107
Figura 4.45. Configuración de las "Expressions".....	108
Figura 4.46. Configuración de los actuadores.....	109
Figura 5.1. Ventana para añadir entradas y salidas al algoritmo de lógica borrosa en Matlab.....	113
Figura 5.2. Entrada 1 del algoritmo de lógica borrosa.....	114
Figura 5.3. Entrada 2 del algoritmo de lógica borrosa.....	115
Figura 5.4. Salida del algoritmo de lógica borrosa.....	115
Figura 5.5. Ventana para añadir reglas básicas al algoritmo de lógica borrosa en Matlab.....	116
Figura 5.6. Conjunto de reglas básicas del algoritmo de lógica borrosa.....	117
Figura 5.7. Ventana para la creación del archivo ".fis".....	118
Figura 5.8. Entrada mediante funciones gaussianas.....	119
Figura 5.9. Entrada mediante funciones lineales.....	119
Figura 5.10. Inicialización de Simulink dentro de Matlab.....	120
Figura 5.11. Ventana principal de Simulink.....	121
Figura 5.12. Icono bloque "In".....	121
Figura 5.13. Icono bloque "Gain".....	121
Figura 5.14. Icono bloque "Fuzzy".....	122
Figura 5.15. Icono bloque "Mux".....	122
Figura 5.16. Icono bloque "Out".....	122
Figura 5.17. Modelo de Simulink.....	123
Figura 5.18. Ventana para importar el archivo ".fis".....	123
Figura 5.19. Configuración bloque "Gain".....	124
Figura 5.20. Creación de una nueva excitación.....	125
Figura 5.21. Configuración de la excitación.....	125
Figura 5.22. Posición relativa del bogie delantero con respecto al coche en el eje Y a lo largo del tiempo, del vehículo provisto de suspensión pasiva.....	126
Figura 5.23. Aceleración en el eje Y que sufre el coche provisto de suspensión pasiva en su parte delantera a lo largo del tiempo.....	127
Figura 5.24. Acceso a la configuración de Simulink.....	128
Figura 5.25. Configuración de "Solver" de Simulink.....	128
Figura 5.26. Configuración de "Signals and Parameters" de Simulink.....	129
Figura 5.27. Selección de los bloques "Gain" al "Global (turnable) parameters".....	129
Figura 5.28. Configuración de "Code Generation" de Simulink.....	130
Figura 6.1. Botón de "Time Integration with measurements".....	132
Figura 6.2. Acceso a la pestaña "info".....	133
Figura 6.3. Botón de "Time Integration".....	134
Figura 6.4. Configuración de la velocidad del vehículo.....	135
Figura 6.5. Posición relativa del bogie delantero con respecto al coche en el eje Y a lo largo del tiempo, del vehículo provisto de suspensión pasiva.....	137
Figura 6.6. Posición relativa del bogie trasero con respecto al coche en el eje Y a lo largo del tiempo, del vehículo provisto de suspensión pasiva.....	137
Figura 6.7. Aceleración en el eje Y que sufre el coche provisto de suspensión pasiva en su parte delantera a lo largo del tiempo.....	138
Figura 6.8. Aceleración en el eje Y que sufre el coche provisto de suspensión pasiva en su parte trasera a lo largo del tiempo.....	139
Figura 6.9. Posición en ejes globales del CDG del coche en el eje Y a lo largo del tiempo.....	140

<i>Figura 6.10. Posición relativa del bogie delantero con respecto al coche en el eje Y a lo largo del tiempo, del vehículo provisto de suspensión activa.....</i>	<i>141</i>
<i>Figura 6.11. Posición relativa del bogie trasero con respecto al coche en el eje Y a lo largo del tiempo, del vehículo provisto de suspensión activa.</i>	<i>141</i>
<i>Figura 6.12. Aceleración en el eje Y que sufre el coche provisto de suspensión activa en su parte delantera.....</i>	<i>142</i>
<i>Figura 6.13. Aceleración en el eje Y que sufre el coche provisto de suspensión activa en su parte trasera a lo largo del tiempo.....</i>	<i>142</i>
<i>Figura 6.14. Fuerza ejercida por los actuadores en el bogie delantero a lo largo del tiempo.</i>	<i>143</i>
<i>Figura 6.15. Fuerza ejercida por los actuadores en el bogie trasero a lo largo del tiempo.</i>	<i>143</i>
<i>Figura 6.16. Posición en ejes globales del CDG del coche en el eje Y a lo largo del tiempo.</i>	<i>144</i>
<i>Figura 6.17. Comparación entre suspensión activa y suspensión pasiva, de la posición relativa del bogie delantero con respecto al coche en el eje Y a lo largo del tiempo.</i>	<i>145</i>
<i>Figura 6.18. Comparación entre suspensión activa y suspensión pasiva, de la posición relativa del bogie trasero con respecto al coche en el eje Y a lo largo del tiempo.</i>	<i>145</i>
<i>Figura 6.19. Comparación entre suspensión activa y suspensión pasiva, de la aceleración en el eje Y del coche en su parte delantera, a lo largo del tiempo.</i>	<i>146</i>
<i>Figura 6.20. Comparación entre suspensión activa y suspensión pasiva, de la aceleración en el eje Y del coche en su parte trasera, a lo largo del tiempo.</i>	<i>146</i>
<i>Figura 6.21. Comparación de la posición en ejes globales del CDG del coche en el eje Y a lo largo del tiempo, del vehículo provisto de suspensión activa frente al provisto de suspensión pasiva.....</i>	<i>147</i>

ÍNDICE DE TABLAS.

<i>Tabla 3.1. Reglas básicas del algoritmo de lógica borrosa.</i>	<i>50</i>
<i>Tabla 4.1. Valores de inercia y masa para el eje montado.....</i>	<i>74</i>
<i>Tabla 4.2. Marcadores suspensión primaria.</i>	<i>80</i>
<i>Tabla 4.3. Valores de inercia y masa del bogie.</i>	<i>83</i>
<i>Tabla 4.4. Marcadores suspensión secundaria.....</i>	<i>86</i>
<i>Tabla 4.5. Valores de inercia y masa para el cabezal fijo del bogie.</i>	<i>89</i>
<i>Tabla 4.6. Marcadores del cabezal fijo del bogie.</i>	<i>92</i>
<i>Tabla 4.7. Valores de inercia y masa para el coche.</i>	<i>99</i>
<i>Tabla 4.8. Marcadores del coche.....</i>	<i>101</i>
<i>Tabla 5.1. Reglas básicas del algoritmo de lógica borrosa.</i>	<i>116</i>
<i>Tabla 5.2. Ganacias Bloques "Gain".</i>	<i>127</i>
<i>Tabla 7.1. Valores límite alcanzados en la simulación.</i>	<i>150</i>
<i>Tabla 7.2. Fuerza máxima por cada actuador.</i>	<i>151</i>

Capítulo 1. Introducción y objetivos

1.1 Introducción

Este documento está ambientado en el mundo de los ferrocarriles, desde la aparición de las primeras locomotoras en el siglo XVIII, los vehículos ferroviarios han estado evolucionando y expandiéndose, si bien es cierto que, sobre todo en la segunda mitad del siglo XX, han sufrido un cierto estancamiento debido a la evolución del transporte por carretera. Sin embargo, la creciente preocupación de la sociedad por el medio ambiente y la contaminación, han hecho que este medio de transporte este cada vez más auge, y todo indica que en el futuro esta tendencia se mantendrá.

El transporte por ferrocarril se trata de un medio de transporte con ciertas ventajas respecto al resto de medios de transporte comúnmente utilizados, la principal de todas ellas, y responsable de que este medio de transporte este en tan buen momento, es su gran economía de consumo, es decir, su bajo consumo de combustible o energía por kilómetro recorrido. Y esto se debe principalmente a el bajo coeficiente de fricción entre el contacto rueda-rail de los vehículos ferroviarios, mucho menor que el de los vehículos de transporte por carretera.

Además, debido al uso mayoritario de motores eléctricos como medio de propulsión de los vehículos ferroviarios, mucho más eficientes que los motores térmicos de combustión interna, y al buen funcionamiento de los sistemas de recuperación de energía disponibles en los vehículos ferroviarios, bastante más eficientes e implementados que en los vehículos de transporte por carretera, hacen de este medio de transporte, una alternativa ecológica, y con un gasto de energía muy bajo teniendo en cuenta las distancias que se recorren, y las grandes cargas que se pueden llegar a transportar (figura 1.1).



Figura 1.1. Vehículo ferroviario de mercancías.

Por todo esto, el sector ferroviario es un sector importante, con una demanda que se prevé crezca en los próximos años. Por ello, es de vital importancia tener un perfecto mantenimiento tanto de vías, como de vehículos ferroviarios, para poder garantizar su perfecto funcionamiento en cualquier momento, y lo que es más importante, la seguridad tanto de sus usuarios como de todo aquello que se vea afectado por el uso de este medio de transporte.

Manteniendo un óptimo mantenimiento de todos los elementos que intervienen en el transporte ferroviario se consigue hacer de éste, un medio de transporte ecológico, rápido, seguro y beneficioso para el desarrollo tecnológico de la sociedad. Y que, además, podría traer consigo un gran ahorro en el uso de los combustibles fósiles y disminuir de esta forma la dependencia de los mismos que existe actualmente.

1.2 Objetivos

En este documento se trata de escribir con la mayor claridad y sencillez posible el desarrollo de un controlador de lógica difusa para la suspensión lateral activa de un vehículo ferroviario.

Además, se muestran conceptos teóricos importantes para la correcta comprensión tanto del comportamiento dinámico de un vehículo ferroviario, como de un controlador basado en lógica difusa, conocida también como lógica borrosa.

Por último, se analizan los resultados obtenidos tras simular el controlador de lógica borrosa mediante Simpack, para lo cual, se realiza un modelo informático de un vehículo ferroviario, el cual, está provisto de suspensiones activas controladas por el controlador de lógica borrosa desarrollado, y se comprueba el correcto funcionamiento de todo el conjunto.

1.3 Estructura del proyecto

El presente documento está dividido en un total de 8 capítulos, el primero de ellos a modo de introducción.

En los capítulos 2 y 3 se muestran tanto conceptos técnicos sobre los vehículos ferrocarriles en general, como conceptos teóricos, en especial sobre la dinámica lateral de un vehículo ferroviario. Además, se explica con la mayor claridad y sencillez posible el funcionamiento de la lógica difusa.

El capítulo 4 está dedicado, únicamente, al modelado en Simpack del vehículo ferroviario, con el cual, se realiza posteriormente la simulación en dicho software. Por otra parte, el modelado del controlador de lógica difusa se detalla en el capítulo 5, además de su posterior configuración.

Por último, las simulaciones realizadas, detallando su procedimiento, y los resultados obtenidos en las mismas, se muestran en el capítulo 6. El análisis de dichos resultados se muestra en el capítulo 7, donde se incluyen las conclusiones.

Capítulo 2. Vehículos ferroviarios

En este segundo capítulo se muestran conceptos básicos de los vehículos ferroviarios, tanto de los tipos de vehículos existentes, como de las partes más importantes de los mismos. Además, se profundiza especialmente en los tipos de suspensiones existentes, así como en sus partes y características más importantes

2.1 Elementos de un vehículo ferroviario

En un vehículo ferroviario existen multitud de elementos de gran importancia, y muchos de ellos varían en función del tipo de vehículo ferroviario con el que se está tratando. Así pues, primeramente se deben conocer los distintos tipos de vehículos ferroviarios existentes (figura 2.1).

Al conjunto de todos los vehículos ferroviarios capaces de circular por vías ferroviarias se le denomina material rodante. Dentro de este conjunto se pueden diferenciar dos grandes grupos: material rodante motor y material rodante remolcado.

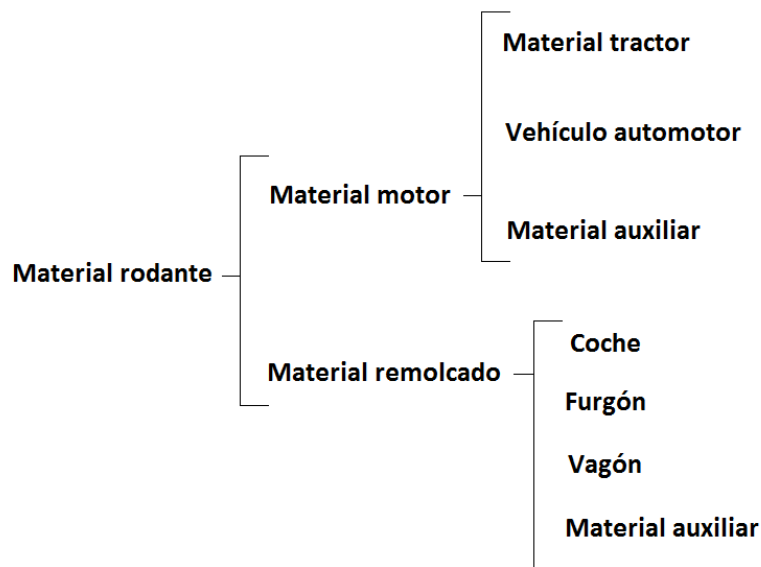


Figura 2.1. Esquema distintos tipos de vehículos ferroviarios.

El material motor engloba a distintos subgrupos dentro de él. Por una parte está el material tractor, vehículos motorizados destinados únicamente a remolcar otro tipo de material rodante y que en ningún caso transportan carga útil. En este grupo se ubicarían los distintos tipos de locomotoras que se pueden encontrar en el mundo ferroviario, tanto las que funcionan únicamente con diésel, las eléctricas o las eléctricas provistas de generadores diésel.

Dentro del grupo de material rodante motor también se puede distinguir el subgrupo de los vehículos automotores, los cuales, van motorizados al igual que los vehículos englobados en el material tractor pero, a diferencia de estos

últimos, los vehículos automotores si llevan carga útil y rara vez se utilizan para remolcar diferente material rodante. Por último, dentro de éste mismo grupo de material rodante motor se puede englobar al material auxiliar, vehículos destinados al mantenimiento y servicio del resto de vehículos englobados en el material rodante motor.

Por otra parte, dentro del grupo del material rodante remolcado, se pueden englobar todos los vehículos ferroviarios carentes de propulsión propia tales como coches (vehículos destinados al transporte de personas), vagones (vehículos destinados al transporte de animales o materiales), furgones (vehículos destinados al transporte de equipaje), y distintos vehículos de material auxiliar [14].

Una vez descritas las diferentes clases de material rodante existentes, para poder conocer de esta manera un poco más en profundidad como pueden variar los elementos de un vehículo ferroviario según el tipo de material rodante al que éste corresponda, se pasa a describir las partes más importantes que componen un vehículo ferroviario.

Las partes más importantes y comunes de un vehículo ferroviario en las que, a continuación se profundizará sobre ellas, son: la caja, los bogies, las ruedas, los ejes, las cajas de grasa, placas de guarda, y suspensiones. Evidentemente, existen multitud de elementos a parte de los anteriormente mencionados tales como motores eléctricos, actuadores, sistemas neumáticos y un largo etcétera que dependen fundamentalmente del tipo de material rodante.

2.1.1 Caja

2.1.1.1 Introducción y tipos de cajas

La caja de un vehículo ferroviario puede estar formada por una carrocería solidaria a un bastidor o por una estructura autoportante (figura 2.2). Los coches, destinados al transporte de personas, suelen utilizar cajas con estructuras autoportantes, ya que mejora sustancialmente el confort de marcha. Los vagones o furgones utilizan cajas con bastidores solidarios a la carrocería, no utilizan bogies, elemento del que se habla más adelante [2].



Figura 2.2. Caja de un coche.

La caja debe soportar la carga que se esté transportando en todo momento, además de soportar los esfuerzos que se le transmiten a través del bastidor o de los bogies al circular por la vía ferroviaria.

En función del tipo de material rodante, la estructura de las cajas puede variar considerablemente. Además de poseer un sistema autoportante o disponer una carrocería solidaria al basculante sino que, por ejemplo, las cajas destinadas a coches de pasajeros disponen de estructuras que permiten colocar grandes ventanales, puertas automáticas, facilitar la circulación por el interior del coche y utilizan materiales más agradables visualmente. Por otra parte las cajas que forman parte de vagones o furgones poseen acabados más espartanos así como grandes puertas para facilitar la carga y descarga del mismo [5].

2.1.2 Ruedas

2.1.2.1 Introducción y características

Las ruedas, junto con los ejes, son las partes más importantes en el material rodante de un vehículo ferroviario. El procedimiento de desplazamiento más ampliamente utilizado en el mundo ferroviario es el de la rueda de acero rodando sobre un carril igualmente de acero [7].

Las ruedas de los trenes tienen por misión sustentar, guiar, transmitir al carril los esfuerzos, lograr circular en curvas y frenar. Cada una de estas funciones induce solicitaciones mecánicas y térmicas en las ruedas.

La seguridad en los trenes es primordial siendo, en el caso de alta velocidad, crítico. Uno de los principales problemas, en cuanto a seguridad, es la aparición de grietas en las ruedas, las cuales, puede afectar de una forma considerable a la seguridad, ya que podrían causar un descarrilamiento del tren.

Otro un punto crítico a considerar, tanto en seguridad como en confort de marcha, es el hecho de presentar el correcto equilibrado de todas y cada una de las ruedas del vehículo ferroviario, en caso contrario, la acción vibratoria correspondiente a la masa desequilibrada llegaría a deformar la superficie de la llanta de la rueda, produciéndose en la caja del vehículo vibraciones o movimientos de pequeña amplitud y alta frecuencia, muy molestos en el caso de vehículos de pasajeros y capaces de provocar un rápido desgaste de los componentes del vehículo ferroviario y mermar, de esta forma, la seguridad del mismo.

Por último, también se le debe prestar gran importancia a la aparición de planos en la llanta debidos normalmente a bloqueos de la rueda durante las fases de frenado del vehículo (figura 2.3), los cuales, al igual que cuando se circula con ruedas desequilibradas, provocan vibraciones que se transmiten a toda la caja del vehículo ferroviario [9].



Figura 2.3. Defecto provocado por un plano en una rueda.

Para evitar un posible fallo, tanto en las ruedas como en otros componentes del vehículo, se hace necesaria la inspección periódica del estado de las ruedas, tanto de su geometría, como de la aparición de grietas o defectos en el material.

2.1.2.2 Partes de una rueda

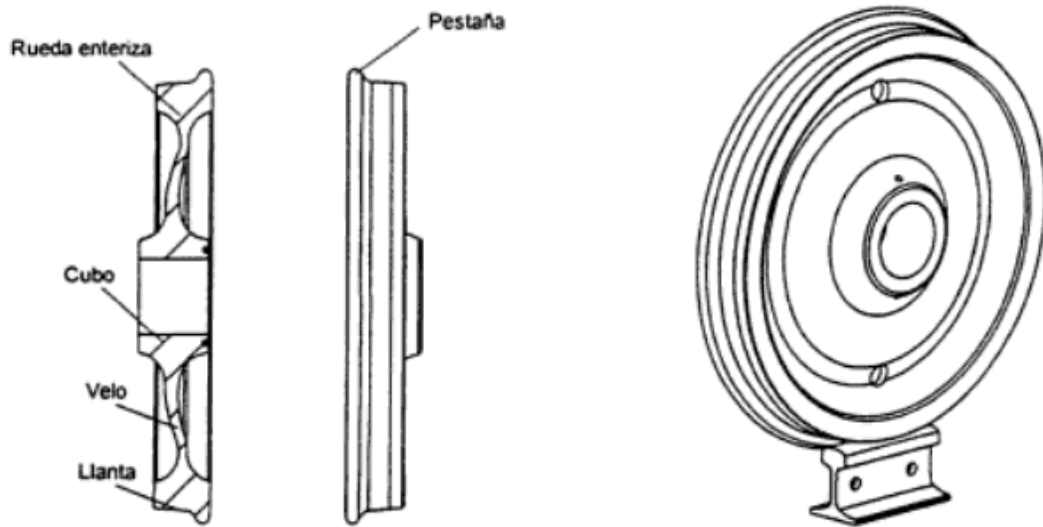


Figura 2.4. Partes de una rueda de ferrocarril.

Las partes fundamentales de una rueda son tres principalmente, (figura 2.4) llanta, velo y cubo. Tanto el velo como el cubo se consideran partes con duración infinita. La llanta sufre un gran desgaste durante su vida útil y es necesario sustituirla o repararla en un periodo de tiempo estimado [5].

- **Velo:** presenta una forma de disco plano u ondulado, está sometido a grandes sollicitaciones provenientes de la pestaña de la llanta y de la gran carga vertical que ha de soportar. Además, debe soportar otros esfuerzos derivados del montaje de sus elementos, desniveles de la vía, esfuerzos térmicos durante las fases de frenado, y la fuerza centrífuga debida a las altas velocidades de rotación que se pueden alcanzar en trenes de alta velocidad [5].
- **Llanta:** es la parte de la rueda que establece contacto con el rail, proporciona la superficie de rodadura de la rueda sobre el mismo y, por tanto, está sometida al desgaste y choques propios de la rodadura. La superficie de rodadura presenta una leve inclinación respecto al plano horizontal denominada “conicidad” siendo, generalmente, su inclinación de 1/20 en el centro de la llanta, y sobre una longitud de 55 a 65 mm, y de 1/10 en el extremo opuesto de la pestaña [5].

2.1.2.3 Tipos de ruedas

Entre los tipos de ruedas que se pueden encontrar en el mundo ferroviario, se puede realizar una clasificación en función de cómo se une la llanta al velo de la rueda. De esta forma se pueden distinguir tres tipos diferentes de ruedas: ruedas monobloque, ruedas con centro y bandaje, y ruedas elásticas.

- **Ruedas monobloques:** la llanta y el velo se unen a través de un radio de acuerdo, perteneciendo la llanta y el velo a la misma unidad (figura 2.5) [8].

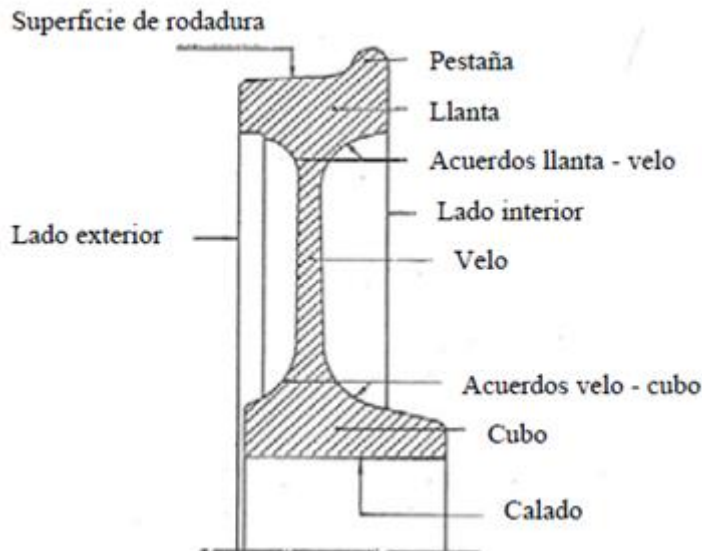


Figura 2.5. Descripción de una rueda monobloque.

- **Ruedas con centro y bandaje:** la llanta se une al velo a través de un aro metálico denominado cinchillo, con calado en caliente (figura 2.6). En este caso es posible cambiar la llanta conservando el velo y el cubo cuando esta se desgasta [8].

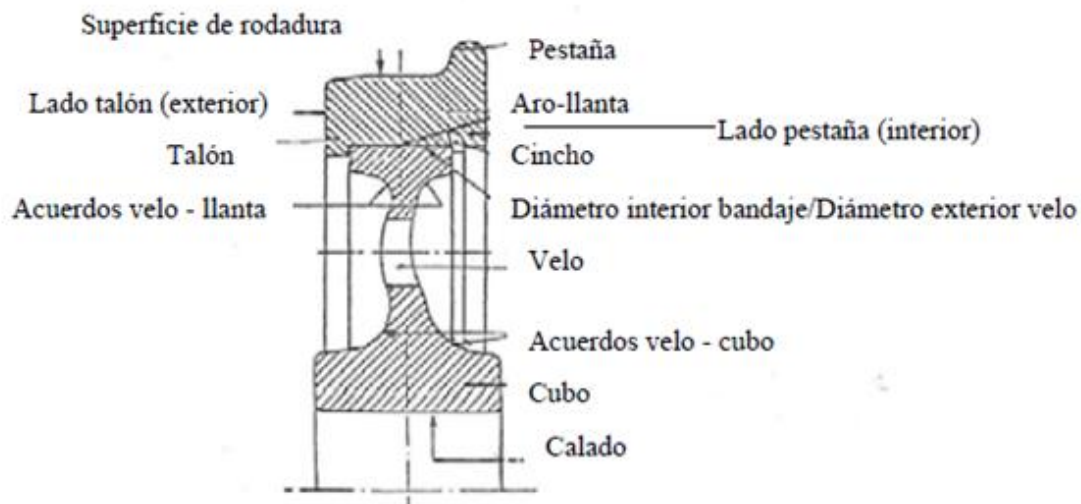


Figura 2.6. Descripción de una rueda con centro y bandaje.

- **Ruedas elásticas:** la llanta se une al velo a través de una banda de goma. En este caso, también es posible cambiar la llanta conservando el velo y el cubo (figura 2.7). La banda elástica amortigua ruidos y vibraciones y es muy usada en las ruedas de los tranvías y metros ligeros [8].

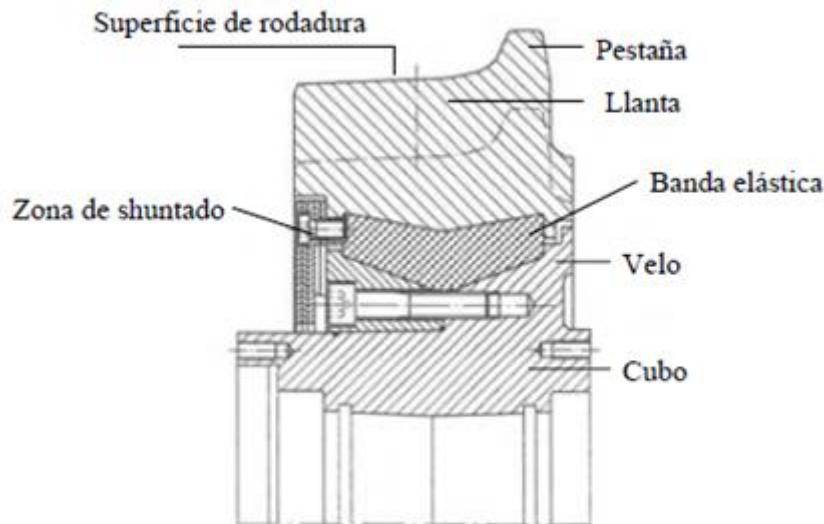


Figura 2.7. Descripción de una rueda elástica.

Por último, cabe mencionar el proceso de colocación de las ruedas en el eje. En los ejes de tipo montados, para su colocación, se fabrica el cubo de la rueda con un diámetro de entre 4 y 6 milésimas de milímetro inferior al de la sección del eje sobre el cual se monta la rueda, posteriormente, se cala el eje en el interior de la rueda mediante una prensa hidráulica, aplicando un proceso térmico de calentamiento previo sobre el material. Una vez terminado el proceso y finalizado el enfriamiento, la presión de calado resultante oscila entre las 40 toneladas mínimas, hasta las 150 toneladas máximas de las locomotoras o vehículos automotores [8].

2.1.2.4 Fabricación de ruedas

Las ruedas de acero pueden ser fabricadas por forja, o por colada. En Europa es más frecuente el uso de ruedas forjadas, mientras que en Estados Unidos es más frecuente el uso de ruedas coladas. La llanta de las ruedas además se suele someter a un tratamiento de templeado y revenido, dejando al velo y al cubo en estado normalizado.

El tratamiento de temple al que se somete la llanta consiste en calentar la rueda en un horno hasta los 827°C para eliminar las tensiones generadas en el forjado. Posteriormente la llanta se enfría con agua pulverizada. Como la primera temperatura está por encima de la temperatura de transformación de fase, se produce la transformación de austenita a perlita durante el enfriamiento. La microestructura perlítica es la que da a la llanta su alta dureza.

En este punto, la llanta se ha enfriado y se expande, mientras que el velo y el cubo siguen calientes y relativamente más blandos. La rueda se deja enfriar al aire durante, aproximadamente, 4 minutos para dejarla posteriormente en un horno a una temperatura de 480°C durante dos horas para aliviar algunas de

las tensiones generadas durante el enfriamiento de la llanta. Durante este período el velo y el cubo se enfrían por debajo del punto de transformación y se contraen tirando de la llanta, que está más rígida. Este fenómeno induce tensiones residuales de compresión en la llanta. Finalmente, la rueda se deja enfriar a temperatura ambiente durante aproximadamente 6 horas.

El resultado es que la parte inferior de la llanta y el velo quedan sometidos a tracción mientras que el resto de la llanta queda a compresión. Este estado de tensiones residuales a compresión impide la formación y crecimiento de grietas, reduciendo el riesgo de fallo en servicio.

Se ha observado que la sensibilidad al agrietamiento térmico aumenta con el aumento del contenido de carbono. La disminución producida en la dureza y la resistencia al desgaste que se produciría al disminuir el porcentaje de carbono debe ser compensada añadiendo aleantes. Por ello, cuando se quieren mejorar las características de resistencia de las ruedas es preferible modificar el tratamiento térmico para lograr un tamaño de grano más fino que aumentar el contenido de carbono en el acero [8].

2.1.3 Ejes

2.1.3.1 Introducción y características

Un eje es un elemento con geometría generalmente axilsimétrica que sirve de soporte para otros órganos, los cuales pueden girar u oscilar alrededor de éste. Dichos órganos pueden ser de muy diversos tipos, como ruedas dentadas, tambores, poleas de un sistema de transmisión, rodets, etc. Un eje puede encontrarse en reposo mientras giran los elementos de máquinas que sustenta (eje inmóvil) o, por el contrario, puede girar solidariamente con dichos elementos (eje giratorio).

Los ejes son componentes del mecanismo del vehículo. Mantienen la posición relativa de las ruedas entre sí. En la mayoría de los vehículos, las ruedas son la única parte que toca el suelo y los ejes deben soportar el peso del vehículo así como cualquier carga adicional que éste transporte, junto con otros esfuerzos, como las fuerzas de aceleración y frenado. Además del objetivo de componente estructural, los ejes deben cumplir con una o más de las siguientes funciones dependiendo del diseño del vehículo [17]:

- **Transmisión:** uno o más ejes deben formar parte del sistema de transmisión. Un sistema mecánico ejerce una fuerza descentrada sobre el eje que, con la reacción del apoyo, da lugar a un momento de fuerzas sobre el mismo, que es transferido hacia las ruedas para la aceleración del vehículo.

- **Frenado:** para disminuir la velocidad de un vehículo se aplica una fuerza descentrada de forma que, con la reacción del apoyo del eje, se forma un momento de fuerzas en sentido contrario a la rotación de la rueda.
- **Guía:** el eje de una rueda debe guiar a la misma para que no se desplace axialmente, así como que no gire involuntariamente respecto a un eje perpendicular al eje de giro.

2.1.3.2 Partes y geometría de un eje ferroviario

Generalmente los ejes adoptan una sección tal para que las tensiones sean aproximadamente uniformes a lo largo de su longitud. Por ello, en diferentes tramos existen diámetros diferentes, siendo extraño encontrar ejes con forma cilíndrica perfecta en toda su longitud.

Los esfuerzos de flexión alternativos de los ejes giratorios, traen consigo el peligro de rotura por fatiga (efectos de entalladura) en todas las transiciones de sección, rebajes, ranuras, etc. Las puntas de tensión pueden eliminarse adoptando diversas precauciones durante el diseño, como puede ser suavizando los cambios de sección.

En el eje de un vehículo ferroviario se distinguen tres partes [17]:

- Fuste o cuerpo del eje comprendido entre ambas ruedas.
- Secciones de calaje o zona de asiento, sobre las que se calan o calzan las ruedas.
- Manguetas, sobre las que reposan los cojinetes de las cajas de grasa, que a su vez soportan el peso suspendido del vehículo.

La figura 2.8 muestra las diferentes partes de las que se compone un eje ferroviario.

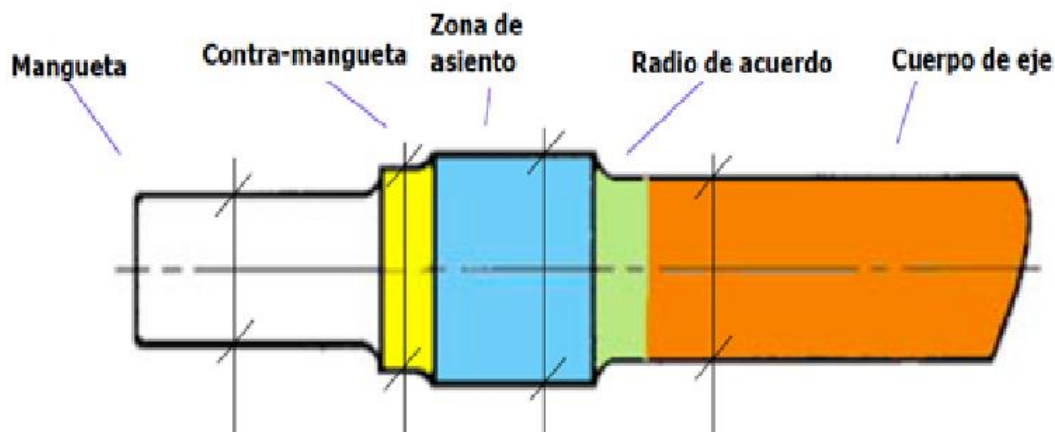


Figura 2.8. Esquema preciso de un eje ferroviario.

Las dimensiones del eje en sus diferentes secciones dependen de la carga a la que se encuentra sometido. Por otro lado, el material está sometido a una gran fatiga, tanto por el esfuerzo cortante procedente del calaje de la rueda, como por la alternancia de las flexiones en la sección de empotramiento de la mangueta.

Los problemas de fatiga que presentan los ejes han hecho que se elaboren normativas específicas, concretamente la norma UNE-EN 13103 [16], para el diseño de los mismos. Las fases de diseño implican:

- Identificación de las fuerzas y cálculo de los momentos en diversas secciones.
- Selección de los diámetros para el cuerpo y las manguetas, el resto se dimensionan a partir de éstos.
- Comparación entre tensión calculada y tensión máxima admisible, función del acero y del tipo de eje (macizo o hueco).

Existen dos tipos de ejes: macizos y huecos. La diferencia entre ambos es que el eje hueco cuenta con un orificio longitudinal de extremo a extremo de la pieza. Mediante esta reducción de materia, se consigue que la pieza pese un 20% menos que la original pero conservando un 90% del momento resistente de la pieza entera.

2.1.3.3 Materiales empleados en su fabricación

El material más utilizado para este tipo de piezas es el acero estructural. En cuanto a su composición, es un acero producto de la aleación de hierro, carbono, y pequeñas cantidades de otros elementos tales como silicio, fósforo, azufre y oxígeno, que le aportan características específicas.

Algunas de sus propiedades son la alta resistencia, la calidad homogénea, la fiabilidad, la soldabilidad, la ductilidad, y la incombustibilidad. Se ha de tener en cuenta que a altas temperaturas sus propiedades mecánicas fundamentales se ven gravemente afectadas. Sin embargo, posee una buena resistencia a la corrosión en condiciones normales. El acero es, más o menos, un material elástico, responde teóricamente igual a la compresión y a la tensión, sin embargo, con grandes fuerzas aplicadas, puede comenzar a comportarse como un material plástico.

Para aplicaciones de cierta responsabilidad, se opta por mejorar el acero estructural simple mediante una serie de procesos de refino. El empleo de aceros aleados, cuando existen esfuerzos oscilantes (flexión alternativa), solamente es ventajoso si no existen efectos de entalladura, ya que los aceros de alta resistencia son sumamente sensibles a este tipo de esfuerzos. A su vez, los ejes contruidos de aceros aleados de alta resistencia, no son más

rígidos que los fabricados de aceros de construcción en general, ya que ambos tipos de material tienen igual módulo de elasticidad.

2.1.4 Cajas de grasa

2.1.4.1 Introducción y características

La caja de grasa es el elemento que proporciona la unión entre los ejes y el bastidor, además facilita la rodadura de los ejes. También es el componente que se encarga de transmitir los esfuerzos de frenado desde los ejes a la masa del vehículo, a la vez que tiene que lubricar las partes metálicas que están en contacto para que así se disminuya el rozamiento y con ello el calentamiento del eje. La caja de grasa recibe este nombre debido a que tradicionalmente se trataba de un receptáculo que envolvía un cojinete de fricción, protegiéndolo y sirviendo para contener el lubricante de engrase.

Sin embargo, actualmente, las cajas de grasa contienen rodamientos de bolas, o de rodillos cilíndricos o esféricos. La envoltente exterior o caja propiamente dicha se fabrica de hierro estampado o acero moldeado y de una sola pieza. Se construyen también cajas de grasa en dos piezas, asegurándose ambas por medio de un estribo de pasadores de sujeción, presentando la ventaja de que pueden desmontarse con facilidad y examinar el cojinete o rodamiento sin necesidad de levantar el vehículo. En la figura 2.9 se muestra el despiece de una caja de grasa.

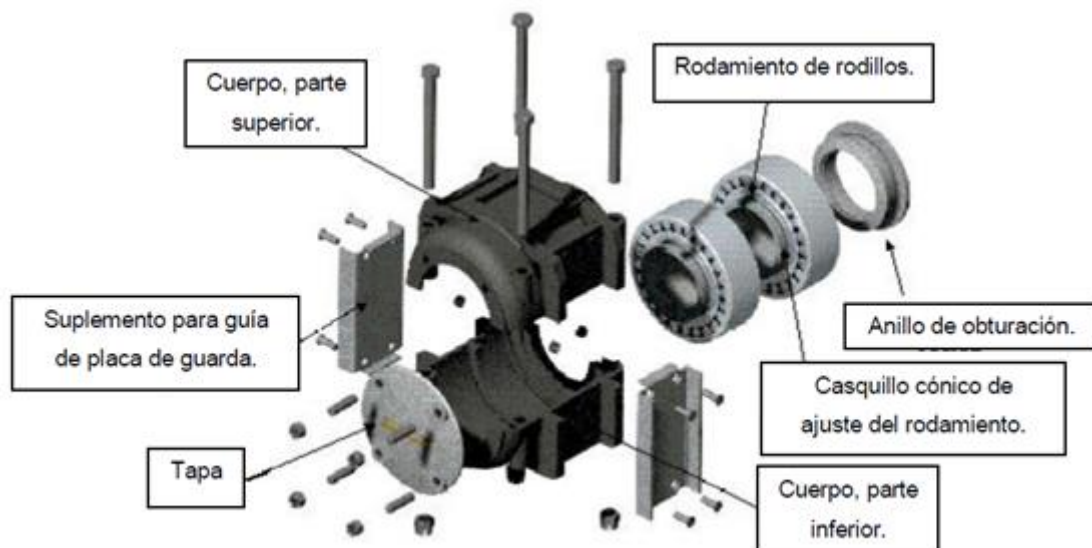


Figura 2.9. Despiece caja de grasa.

Sobre la caja de grasa están fijados los resortes o ballestas que soportan el bastidor del vehículo ferroviario, transmitiendo la carga a la parte final de la rueda.

2.1.4.2 Tipos de cajas de grasa

Las cajas de grasa se pueden clasificar dependiendo de diversos factores tales como:

- Si los rodamientos se encuentran en la parte interior o exterior del eje.
- La forma externa de la caja de grasa, la cual, se suele determinar por el método de la conexión entre la caja de grasa y el cuerpo del bogie, tipo de suspensión, y con el fin de conseguir una distribución de fuerzas uniforme en el rodamiento.
- La construcción interna de la caja de grasa, la cual, está determinada por el tipo de rodamiento utilizado y por su método de sellado.
- El tipo de cojinete utilizado, de fricción o de rodamientos.

Las cajas de grasa con cojinetes de fricción en la actualidad se consideran obsoletas ya que presentan algunos inconvenientes, importantes como son:

- El elevado coeficiente de fricción que existe cuando se parte del reposo.
- Fiabilidad muy baja.
- El mantenimiento es muy complicado, laborioso y de alto coste.
- Alto índice de contaminación ambiental.

A pesar de estas desventajas, si se analiza el comportamiento dinámico del vehículo ferroviario, las cajas de grasa con cojinetes de fricción tienen ciertas ventajas, como por ejemplo, la existencia de cajas de grasa con rodamientos planos que no requieren lubricación en ciertos tipos de material rodante, aunque hay que decir que su uso no está muy extendido.

En cuanto las cajas de grasa que cuentan con rodamientos en vez de cojinetes de fricción, los rodamientos utilizados en la actualidad, cuentan con una jaula de material compuesto, van lubricados y poseen elementos de cierre lateral que permiten asegurar una vida de funcionamiento muy alta.



Figura 2.10. Caja de grasa con sensor instalado en la obturación del rodamiento.

Además de estas mejoras, se están empleando cada vez más rodamientos sensorizados (figura 2.10) que permiten medir la velocidad de giro, detectando posibles bloqueos de rueda que produzcan planos en la misma, y permitiendo disponer de información sobre la temperatura también, permitiendo de esta forma mejorar la seguridad y control del vehículo ferroviario [6].

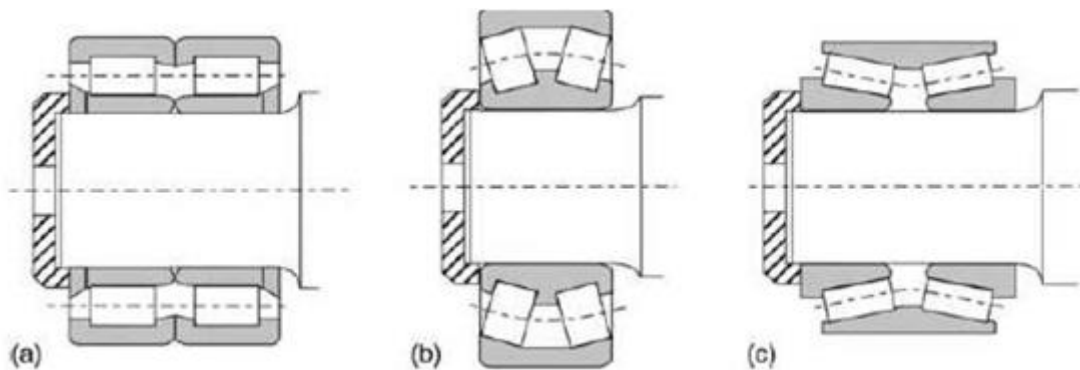


Figura 2.11. Tipos de rodamientos en las cajas de grasa.

De entre las cajas de grasa que cuentan con rodamientos, se puede hacer una distinción de las mismas en función del tipo de rodamiento utilizado:

- **Rodamientos cilíndricos (figura 2.11 (a)):** los rodamientos o cojinetes de rodillos cilíndricos poseen una elevada capacidad dinámica en dirección radial, pero son incapaces transmitir fuerzas axiales. La experiencia en la realidad indica que las caras de los rodillos pueden soportar fuerzas laterales. Sin embargo, para realizar esto satisfactoriamente es indispensable el que se regule el diámetro y la longitud de los rodillos, así como la holgura radial y axial.

- **Rodamientos cónicos (figura 2.11 (b)):** son capaces de transmitir esfuerzos axiales por medio de la superficie cilíndrica debido a su inclinación para la rotación del eje. Por este motivo, es indispensable mantener las tolerancias en los diámetros de las bolas y las holguras aproximadamente un orden de magnitud más ajustadas que para el caso de los rodamientos cilíndricos. Estos rodamientos presentan elevados coeficientes de fricción, frente a los que tienen los rodamientos de rodillos y por tanto generan más calor. Esto, además de implicar un incremento notable en el consumo en la tracción, también origina grandes dificultades a la hora de realizar los diagnósticos de las unidades de la caja de grasa durante el movimiento.

En la actualidad, se están usando rodamientos de tipo antifricción o tipo cartucho cuya característica principal es que no hace falta desmontar el rodamiento para su fijación, sino que se instala como una sola pieza.

- **Rodamientos esféricos (figura 2.11 (c)):** estos rodamientos no suelen ser utilizados de manera extensa debido a su elevado coste y a su baja capacidad de soportar carga, aunque se caracterizan por tener una mejor distribución de carga.

Hay que decir que, los rodamientos de bolas, suelen estar a menudo combinados con rodamientos de rodillos en aplicaciones ferroviarias con el fin de transmitir las fuerzas axiales.

El material rodante de alta velocidad, normalmente, suele tener tres rodamientos en la caja de grasa: dos que se encargan de transmitir las fuerzas radiales y uno que frecuentemente suele ser el de bolas, que es el que trabaja axialmente.

2.1.5 Placas de guardia

2.1.5.1 Introducción y características

Las placas de guardia son piezas en forma de horquilla, unidas a los largueros del bastidor y entre cuyos brazos o guías deslizan las cajas de grasa (figura 2.12). Funcionan esencialmente como aparato de seguridad, cuyo objetivo es mantener las cajas de grasa en su posición normal y sujetar el eje en caso de avería del muelle de la suspensión.

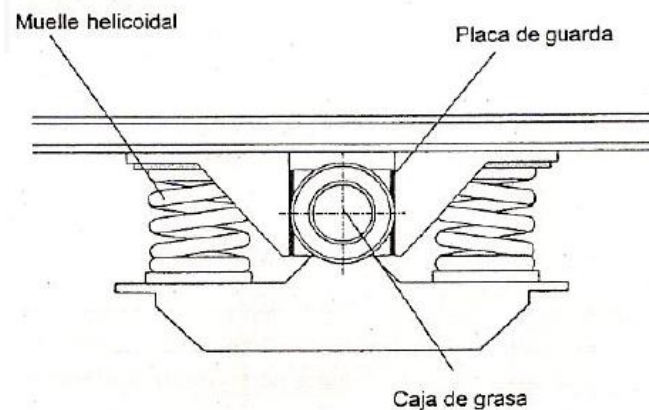


Figura 2.12. Esquema de ubicación de la placa de guardia.

Es frecuente, sobretodo en material de mercancías, que las dos guías o brazos de la placa de guardia, mencionados anteriormente, se enlacen por medio de una pieza llamada “ataguía”, colocada lo bastante baja como para no llegue a entrar en contacto en ningún momento con la caja de grasa cuando esta empiece a oscilar durante el movimiento del vehículo ferroviario [5].

2.1.6 Elementos de la suspensión

2.1.6 .1 Introducción

La suspensión es una parte de gran importancia dentro de cualquier vehículo ferroviario, en esta parte se procede a nombrar y describir brevemente los elementos más comunes que se pueden encontrar en los sistemas de suspensión de cualquier vehículo ferroviario. Más adelante, se muestran con mucha mayor profundidad diversos aspectos y tipos de suspensiones existentes en los puntos 2.2 y 2.3 de este mismo documento.

2.1.6.2 Elementos elásticos

Los elementos elásticos más comunes que se pueden encontrar en los sistemas de suspensión de un vehículo ferroviario son:

- **Ballestas (figura 2.13):** están formadas por hojas metálicas, tanto de sección constante como de sección parabólica o incluso trapezoidal, colocadas unas sobre las otras formando un conjunto flexible y a su vez capaz de disipar energía debido a los pequeños desplazamientos relativos entre las distintas hojas metálicas y las fuerzas de rozamiento que se generan entre ellas cuando el elemento elástico está trabajando. Sin embargo, en la inmensa mayoría de los casos el empleo de ballestas va acompañado del uso de amortiguadores hidráulicos, debido a que la capacidad de disipar energía de las ballestas es muy limitada, irregular y difícilmente controlable. Resulta un elemento muy tradicional en muchos

tipos de suspensiones, no solo de vehículos ferrocarriles, y ha sido empleado ampliamente durante mucho tiempo, si bien es cierto que en la actualidad su uso ha descendido en favor de otros elementos elásticos más modernos.



Figura 2.13. Ballesta.

- **Muelles helicoidales (figura 2.14):** constan de una varilla en forma de hélice la cual trabaja tanto a flexión como a compresión, en los vehículos ferroviarios son muy utilizados, sustituyendo en algunos casos a las ballestas debido a su mayor sencillez a la hora de regular su rigidez y de su pequeño tamaño. No presentan ningún tipo de amortiguamiento propio en su funcionamiento y por ello van siempre acompañados de amortiguadores que completan el conjunto.



Figura 2.14. Muelles helicoidales.

- **Muelles Helicoidales de fleje (figura 2.15):** son un caso particular de los ya mencionados muelles helicoidales. Se caracterizan por presentar una rigidez no lineal y suelen utilizarse como elemento de la suspensión primaria en coches de pasajeros.



Figura 2.15. Muelle helicoidal de fleje.

- **Muelle Belleville (figura 2.16):** se basa en la compresión de elementos en forma de discos interconexiónados. Su rigidez depende de los discos utilizados y la separación de diseño entre ellos, cuanto mayor desplazamiento relativo entre discos este permitido, menor será la rigidez.



Figura 2.16. Muelle Belleville.

- **Muelles neumáticos de anillos (figura 2.17):** consta de un cilindro y un pistón neumático que consta de un sellamiento de goma en forma de diafragma o de volutas, siendo el número de éstas variable en función del modelo de muelle. Estas volutas forman exteriormente debido a la geometría cilíndrica, anillos alternativos que se comprimen o se traccionan, es un elemento muy ligero y que presenta gran capacidad para disipar energía cuando está trabajando, razón por la cual es muy utilizado como tope para absorber impactos. Además, proporciona un óptimo filtrado de altas frecuencias, una curva fuerza-deformación progresiva que es casi independiente de la carga, gran confort de marcha, reducción de la transmisión de ruidos que se producen en el contacto rueda-carril y un mantenimiento relativamente bajo.



Figura 2.17. Muelle neumático.

El muelle neumático se alimenta del aire comprimido procedente del sistema de frenos, o de otros sistemas neumáticos secundarios de los que se disponga en el vehículo, produciendo una fuerza que equilibra la carga aplicada manteniendo constante el desplazamiento y, por lo tanto, la altura de la suspensión. Esto es algo muy útil en vehículos de pasajeros donde la carga puede llegar a duplicar la tara, y para tener establecida con gran precisión la zona de trabajo de los amortiguadores, disminuyendo el desgaste de los mismos.

La rigidez de un muelle neumático bajo una carga particular depende del volumen del cilindro, si éste es insuficiente, se puede incrementar efectivamente conectando el cilindro a un acumulador neumático. Si el elemento es comprimido lentamente, aunque no lo suficientemente lento como para que la regulación automática introduzca un cambio apreciable, el aire del cilindro será comprimido y se incrementará la fuerza en el pistón, produciendo la acción de restauración necesaria.

En estas circunstancias, los cambios son isotérmicos y la presión es inversamente proporcional a la presión del cilindro. Si, sin embargo, la compresión es rápida, no hay tiempo suficiente para ajustar la temperatura y el proceso será prácticamente adiabático (figura 2.18).

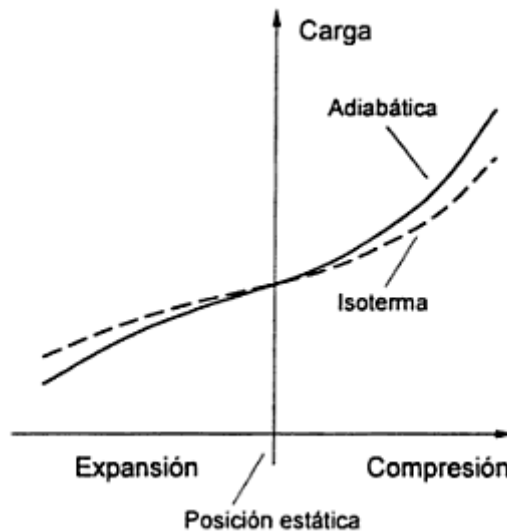


Figura 2.18. Carga de un muelle neumático en función de los esfuerzos a los que está sometido.

Como principales desventajas del uso de los muelles neumáticos de anillos, cabe mencionar su alto coste de instalación, su incapacidad para proporcionar estabilidad tanto transversal como longitudinal necesitando, por ello, de elementos auxiliares que eliminan la ventaja inicial de la ligereza que proporcionan los muelles neumáticos. Por último, también cabe destacar como desventaja, una posible deficiencia de abastecimiento de aire comprimido inhabilitando por completo la suspensión, razón esta última, por la cual, se suelen instalar junto a los muelles neumáticos, suspensiones metálicas capaces de filtrar las irregularidades de la vía en caso de que se produzca un déficit de aire comprimido en el muelle neumático [5].

- **Muelles elastómeros:** están fabricados normalmente de caucho o de materiales compuestos, presentan una histéresis natural importante, y por tanto, una adecuación para la supresión de vibraciones de alta frecuencia. El comportamiento de estos materiales puede variar considerablemente en función de la composición y de su forma, presentando valores de resilencia (capacidad de almacenar energía en función del volumen deformado elásticamente), en general, superiores a los de un acero.

Estos elementos presentan ventajas en lo concerniente a su aplicación en partes móviles y superficies con deslizamiento a la hora de evitar el desgaste y los ruidos provenientes de la alta frecuencia, siendo de uso extendido en ferrocarriles subterráneos. También se utilizan en combinación con otros sistemas tanto en suspensiones primarias, como en suspensiones secundarias, además de ser muy común su colocación entre la caja de grasa y el bastidor (figura 2.19).

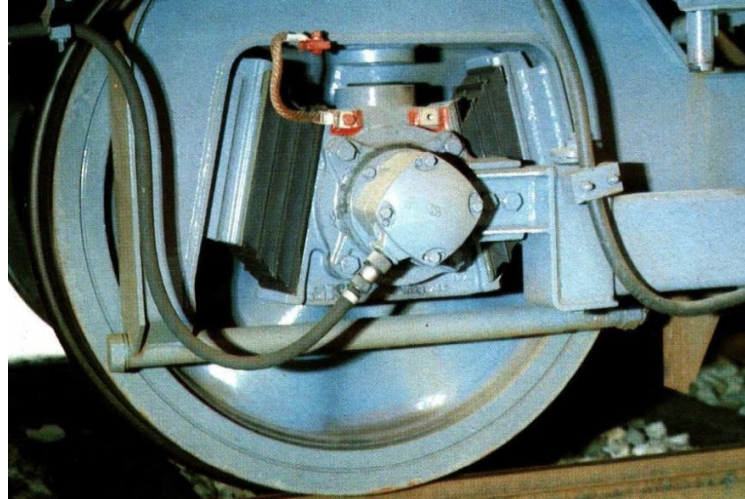


Figura 2.19. Muelle elastómero.

También cabe destacar que este tipo de elemento elástico presenta una serie de desventajas a tener en cuenta, como pueden ser la tendencia natural a fluir o a ser inestables, la memoria de carga que presentan debido a las cargas permanentes y ondulatorias que soportan, y a que las propiedades del material elástico son variables a lo largo del tiempo. Por último, se ha de tener en cuenta que, el material con el que son fabricados estos elementos elásticos, posee una gran sensibilidad respecto a la temperatura que hacer variar la altura del elemento hasta un 12%, fenómeno al que se conoce como “efecto Joule” y que es totalmente reversible.

En cuanto a la configuración del elemento elástico, la carga puede ser soportada por un bloque de goma o elastómeros de composición determinada, o por varios elementos elásticos separados por placas de acero entre sí (figura 2.20), en función del factor de forma o relación entre área cargada y área libre, y la carga concreta que se ha de soportar, se escogerá una configuración u otra.



Figura 2.20. Muelles elastómeros formados por varios elementos.

- **Barras de torsión:** se trata de un elemento elástico de material generalmente metálico que permite, principalmente, aumentar el confort de marcha, aunque también presenta beneficios sobre la estabilidad del vehículo. El aumento del confort es debido a que la barra de torsión complementa a los resortes principales y permite utilizar resortes de menor dureza, absorbiendo de esta forma mejor las irregularidades que presenta el terreno.

El uso de resortes de menor rigidez no compromete la estabilidad en curva, ni aumenta el balanceo del vehículo. Esto es debido a que es, precisamente en estos casos, cuando las barras de torsión entran en funcionamiento, equilibrando las cargas que soportan las ruedas de un mismo eje, e impidiendo de esta forma que ni la rueda interior se descargue demasiado, ni la exterior soporte cargas demasiado elevadas.

2.1.7 Bogie

2.1.7.1 Introducción y características

Los bogies (figura 2.21) son elementos de vital importancia dentro del vehículo ferrocarril, albergan elementos tan importantes como las ruedas, ejes, cajas de grasa, placas de guardia y suspensiones anteriormente nombrados, y de ellos depende en gran medida el comportamiento que es capaz de ofrecer el vehículo.

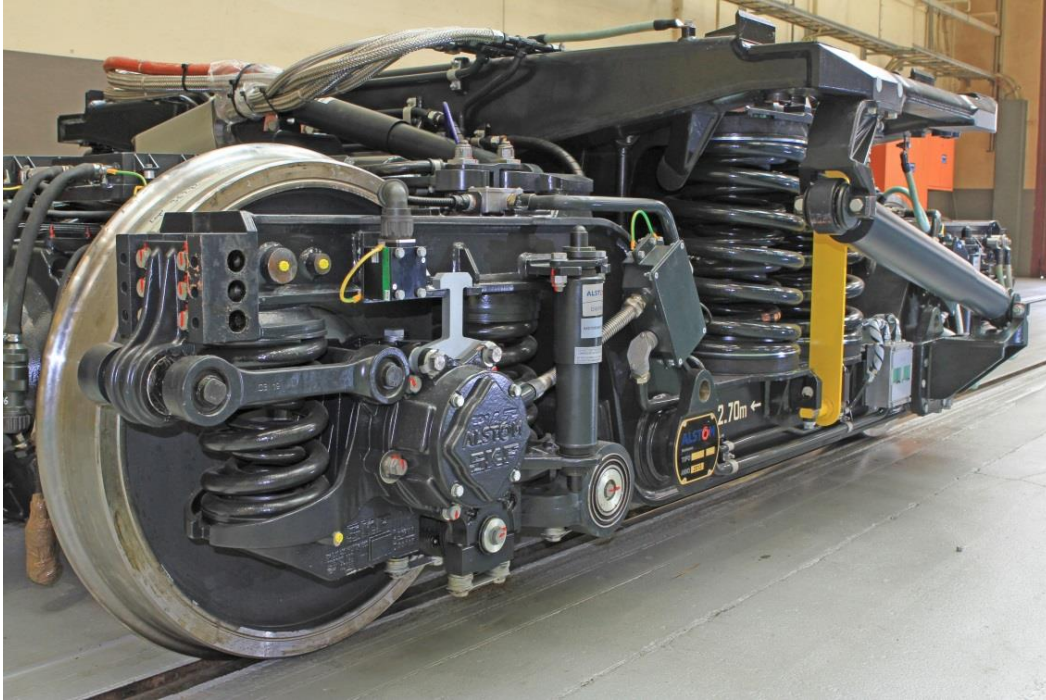


Figura 2.21. Bogie.

El uso de bogies en un vehículo ferroviario le permite a éste tener una mayor facilidad a la hora de tomar las diferentes curvas del trazado por el que vaya a circular, debido a que la longitud de su base rígida queda limitada únicamente a la longitud de los bogies. Además, también mejora en gran medida el confort de marcha del vehículo, y es capaz de reducir a la mitad los desniveles de altura que sufre la caja del vehículo debidos a las irregularidades de la vía (figura 2.22) [7].

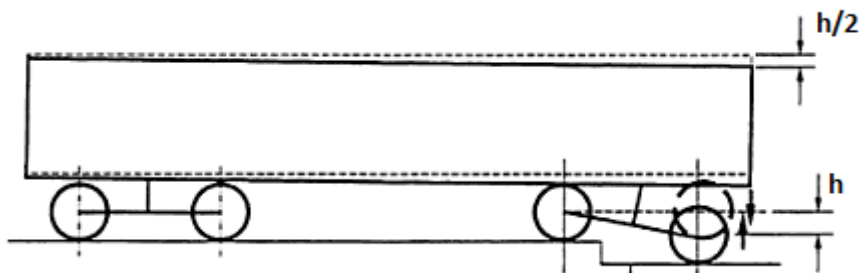


Figura 2.22. Mejora del confort debida al uso de bogies.

El cuerpo principal del que está compuesto un bogie se denomina bastidor, el bastidor se compone de largeros y traviesas unidos rígidamente formando una estructura generalmente en forma de "H" que proporciona la base fundamental del bogie sobre la cual se asientan el resto de elementos que lo componen, dicho bastidor a su vez, está articulado con respecto a la caja del vehículo ferroviario, permitiendo la rotación relativa entre ambos respecto al eje vertical.

Otro elemento importante en el bogie son las barras de tracción, las cuales se encargan de transmitir los esfuerzos de frenado y tracción del bogie a la caja del vehículo ferroviario y están compuestas por dos barras metálicas

articuladas en sus extremos y unidas entre sí que conectan al bogie con la caja.

2.1.7.2 Tipos de bogies

En cuanto a los diferentes tipos de bogies que se pueden distinguir, una de las principales divisiones que se puede hacer distingue entre bogies remolcados y bogies motor. Estos últimos disponen de un motor eléctrico y de una reductora sobre su bastidor, lo cual dificulta en gran medida el diseño del mismo, pero proporciona motricidad a las ruedas del bogie permitiendo desplazarse al vehículo ferroviario por sí mismo. El bogie puede tener todos sus ejes motrices o únicamente uno de ellos, dependiendo de la configuración del bogie.



Figura 2.23. bogie de dos ejes.

Además, el número de ejes del bogie puede variar, normalmente los bogies están diseñados para albergar dos ejes por bogie (figura 2.23), sin embargo también existen diseños de bogies con tres ejes por bogie (figura 2.24). Teniendo en cuenta esto último, el bogie puede tener todos sus ejes motrices, únicamente dos de ellos, o solamente un eje motriz, dependiendo de la configuración del bogie.



Figura 2.24. Bogie de tres ejes.

2.2 Tipos de suspensiones

Existen diferentes tipos de suspensiones dentro de un mismo vehículo ferroviario, las principales son la suspensión primaria y la suspensión secundaria, esta última puede no estar presente en todos los tipos de vehículos ferroviarios. A continuación, se profundiza en cada uno de los tipos de suspensiones presentes en un vehículo ferroviario, tanto secundarias como primarias.

2.2.1 Introducción

Las funciones de la suspensión son: el filtrado de las vibraciones, la transmisión de los esfuerzos y el guiado de las ruedas. La diferencia fundamental entre los diversos tipos de suspensiones radica en la utilización o no de bogies.

Cuando se utilizan bogies, la suspensión de los vehículos ferroviarios se realiza, normalmente, en dos etapas (pudiendo, incluso, llegar a ser más de dos etapas en algunos casos concretos), cada una de las cuales bien diferenciadas y conocidas como suspensión primaria y suspensión secundaria. En ambas se entra en detalle más adelante en los puntos 2.2.2 y 2.2.3 respectivamente.

La suspensión primaria es la que existe entre los ejes y el bastidor del bogie, y la secundaria, entre dicho bastidor y la caja. Sólo algunos vagones de

mercancías no utilizan bogie y tienen por tanto una suspensión de una única etapa.

Dentro de las suspensiones de una única etapa, la más comúnmente utilizada es la conocida como suspensión articulada de ejes convergentes (figura 2.25). En este tipo de suspensiones, el eje tiene la propiedad de ser capaz de desplazarse de su posición inicial cuando el trazado de la vía así lo demanda. Además, cuenta con ballestas como elemento elástico en la suspensión que le confiere cierto grado de confort de marcha.

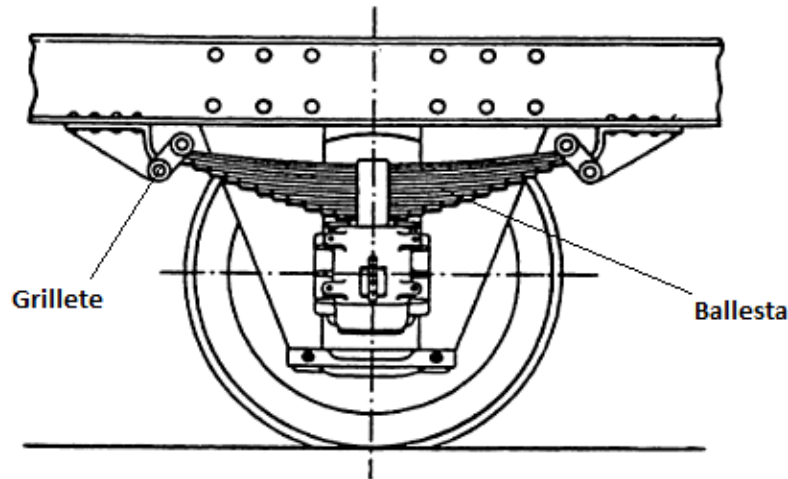


Figura 2.25. Suspensión articulada de ejes convergentes.

La configuración de este tipo de suspensión, de una única etapa, se basa en la unión de los extremos de cada ballesta al bastidor mediante un par de elementos denominados grilletes, que hacen la función de bielas y permiten el desplazamiento de la rueda en dirección longitudinal (figura 2.26), además de en la dirección vertical que permite la propia ballesta al flexionarse.

Además, es importante cerciorarse de que el movimiento de los grilletes de su posición inicial (permitiendo dicho movimiento longitudinal de la rueda), también provoca la flexión de la propia ballesta, permitiendo de esta forma ejercer una acción de orientación y regulación de la posición del eje por parte de la ballesta, que se encarga de devolver al eje a su posición inicial cuando las cargas que actúan sobre el eje dejen de hacerlo.

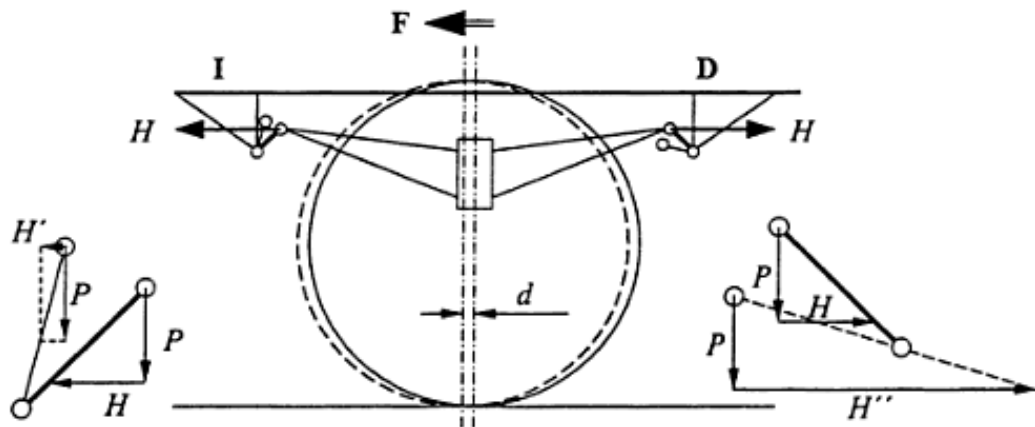


Figura 2.26. Esfuerzo de convergencia sobre la suspensión.

Cabe destacar que la longitud de los grilletes, al igual que la rigidez de las ballestas a un lado y otro del eje tienen que ser iguales, con muy poco margen de error. Además, en la posición de reposo del eje, la inclinación de los grilletes ha de ser también la misma, de lo contrario la orientación del eje una vez en marcha no sería la adecuada en ningún momento [5].

2.2.2 Suspensión primaria

La suspensión primaria (figura 2.27), como se ha mencionado ya, se encarga de conectar el eje montado con el bastidor del bogie, y cumple dos funciones principalmente. Por una parte, reduce las vibraciones que sufre el bogie y todos los elementos que van montados sobre él y, por otra parte, asegura un reparto homogéneo de cargas sobre las ruedas. Esto cobra gran importancia en fases de frenado y de tracción, y a su vez, elimina en gran medida el riesgo de descarrilamiento, que está muy relacionado con estados de carga sobre las ruedas muy bajos [17].

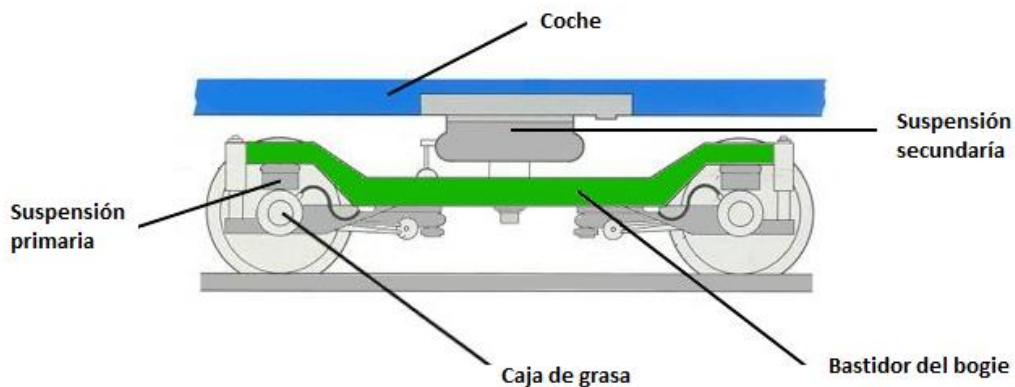


Figura 2.27. Esquema de suspensión primaria y suspensión secundaria.

Existen varias clases de suspensiones primarias en función de los elementos elásticos utilizados y de su geometría. Las más importantes y comunes son:

- **Mediante banda elástica (figura 2.28):** consta de un compuesto elástico que se sitúa entre la caja de grasa y el bastidor del bogie. Es un tipo de suspensión que trabaja muy bien en altas frecuencias, pero su capacidad para absorber grandes irregularidades del terreno es muy limitada.

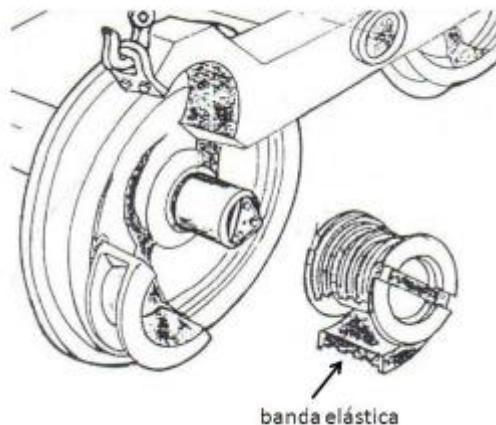


Figura 2.28. Suspensión primaria mediante banda elástica.

- **Mediante fuelles de goma (figura 2.29):** se trata de una alternativa al uso de bandas elásticas entre la caja de grasa y el bastidor del bogie. En su lugar, se suelen colocar dos fuelles en paralelo por cada rueda del bogie, consiguiendo un efecto parecido al del uso de bandas elásticas.



Figura 2.29. Suspensión primaria mediante fuelles de goma.

- **Mediante muelles helicoidales (figura 2.30):** al igual que en el caso anterior, el elemento elástico, (en este caso un muelle helicoidal), conecta la caja de grasa con el bastidor del bogie. Y, de igual manera que en el caso de los fuelles de goma, los elementos elásticos se suelen colocar por parejas, utilizando dos muelles en paralelo por cada rueda del bogie. El uso de muelles helicoidales aumenta el recorrido de la suspensión primaria respecto al uso de fuelles de goma pero, sin embargo, disminuye la eficacia de la suspensión al trabajar en altas frecuencias al carecer de

amortiguamiento, razón por la cual se suele colocar complementando a la pareja de muelles helicoidales, uno o varios amortiguadores que sean capaces de disipar energía en las situaciones que se requiera.



Figura 2.30. Suspensión primaria mediante muelles helicoidales.

- **Mediante brazo articulado (figura 2.31):** el bastidor del bogie posee un brazo longitudinal articulado mediante un silentblock y controlado, normalmente, mediante un muelle helicoidal, y un amortiguador hidráulico. Se trata de un tipo de suspensión primaria muy efectiva, capaz de absorber grandes irregularidades y que asegura perfectamente el arrastre longitudinal del eje [5].

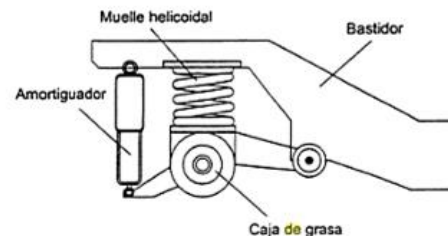


Figura 2.31. Suspensión primaria mediante brazo articulado.

- **Mediante balancín entre cajas (figura 2.32):** consta de un balancín que une las cajas de grasa de dos ejes y sobre el cual van montados los elementos elásticos de la suspensión que lo conectan al bastidor del bogie. Tiene, como gran desventaja, una mayor masa no suspendida, si bien es cierto que el diseño en algunos casos puede simplificarse respecto a otros sistemas de suspensión primaria [5].



Figura 2.32. Suspensión primaria mediante balancín entre cajas.

2.2.3 Suspensión secundaria

La suspensión secundaria conecta el bogie con la caja (figura 2.27), la misión principal que ha de cumplir es la del filtrado de las vibraciones tanto transversales como verticales. Para el filtrado de las vibraciones transversales se utilizan suspensiones con frecuencias naturales de en torno a 0,7 Hz, mientras que para las vibraciones verticales se usan suspensiones con frecuencias naturales de en torno a 1 Hz.

Además de filtrar vibraciones, la suspensión secundaria sirve de apoyo vertical entre la caja y el bogie, como sistema de arrastre longitudinal, como mecanismo de guiado longitudinal y como mecanismo de control del giro relativo entre el bogie y la caja, controlando el conocido como “movimiento de lazo” (oscilación lateral de los ejes combinada con el giro relativo del bogie con respecto al coche que se produce a alta velocidad y que provoca desgaste e inestabilidad en el vehículo).

En la suspensión secundaria es muy común encontrarse con muelles neumáticos de anillos, debido a que filtran muy eficazmente las vibraciones y el sonido de la vía a la caja y a que permiten mantener en todo momento una altura constante de la caja respecto al bogie, independientemente de la carga transportada o la cantidad de pasajeros que albergue el vehículo [5].

2.3 Tipos de suspensiones: pasivas, activas, y semi activas

La suspensión de un vehículo ferroviario en concreto, ya sea la suspensión primaria, la suspensión secundaria u otro tipo de suspensión, puede trabajar de tres formas diferentes básicamente en función del tipo de suspensión que se trate. Así pues, las suspensiones pueden ser pasivas (no están controladas durante su fase de funcionamiento por ningún controlador electrónico), semi activas (su comportamiento durante su fase de funcionamiento es limitado, aunque controlable electrónicamente), o activas (su comportamiento es controlable completamente mientras la suspensión está en funcionamiento).

2.3.1 Suspensiones pasivas

Las suspensiones pasivas son todas aquellas que no disponen de regulación constante a lo largo del tiempo de ninguno de sus parámetros, tales como el amortiguamiento o la rigidez. Con lo cual, el sistema de suspensión pasivo no necesita de ningún controlador o unidad de control para que el sistema funcione correctamente. Únicamente se debe montar las suspensiones con el tarado adecuado al uso que vayan a tener que soportar, pero siendo este tarado fijo durante el periodo de tiempo en el que la suspensión esté trabajando.

Las suspensiones pasivas, puesto que son las más convencionales y fueron las primeras en aparecer, se han ido utilizando a lo largo de los años en todos los ámbitos ferroviarios, y no ha sido hasta cuando la tecnología informática ha avanzado lo suficiente, cuando este tipo de suspensiones ha ido dejando paso en algunos ámbitos a la suspensión activa o semi activa, más cara, pero con mejores resultados en muchos ámbitos. Sin embargo, el uso de suspensiones pasivas se ha ido manteniendo puesto que su resultado para algunos tipos de vehículos resulta satisfactorio a la par que económico.

2.3.2 Suspensiones activas

En las suspensiones activas, la relación entre las salidas y las entradas de la suspensión depende de los sensores, actuadores y de la unidad de control de los mismos, donde el software hace un papel fundamental. En la figura 2.33 se muestra un esquema general de una suspensión activa.

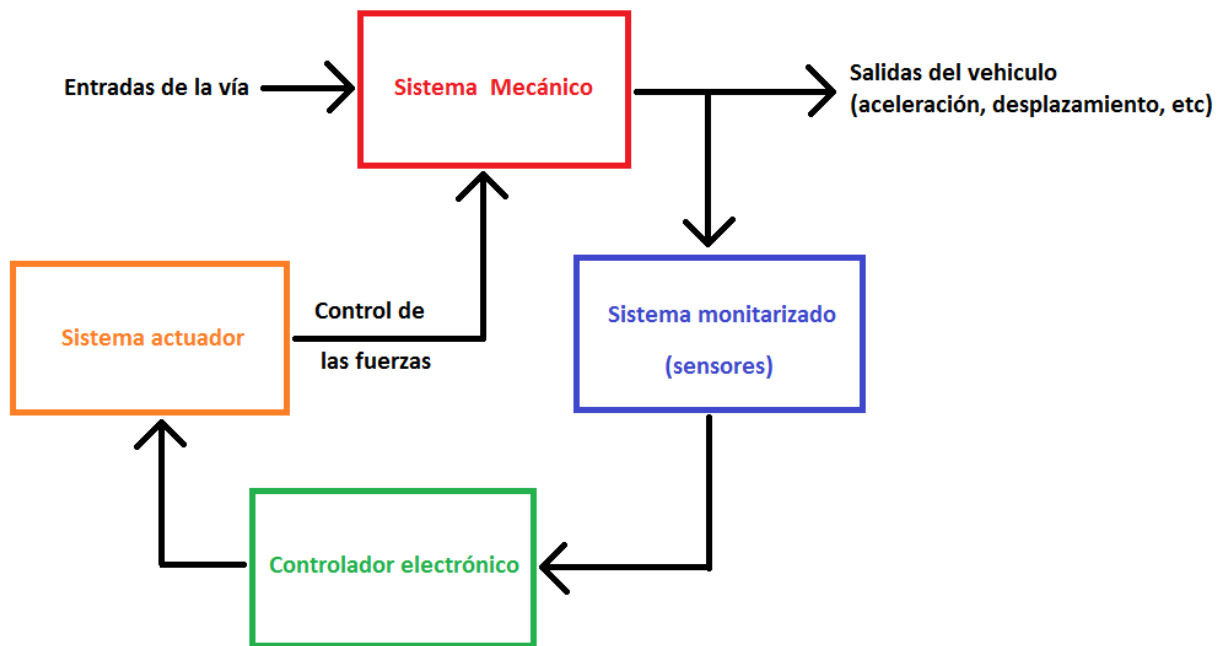


Figura 2.33. Esquema general de una suspensión activa.

La utilidad de las suspensiones activas frente al uso de las convencionales suspensiones pasivas ha sido un hecho contrastado y conocido por cualquier especialista en dinámica de vehículos desde hace bastante tiempo, dándose los mayores estudios en este ámbito en los años 1975, 1983 y 1997, y constatándose que con el uso de suspensiones activas se permite que se puedan alcanzar prestaciones que antes, o bien eran muy complicadas de conseguir, o directamente eran imposibles. Sin embargo, la única aplicación consagrada y plenamente integrada de las suspensiones activas en la actualidad, reside en el sistema basculante, en el cual, posteriormente se profundiza ligeramente. Además de éste, existen otras dos grandes categorías, no tan consagradas en la actualidad como el sistema basculante, pero que están en constante evolución y cuyo uso está bastante extendido y en aumento: las suspensiones activas secundarias y las suspensiones activas primarias [2].

2.3.2.1 Trenes basculantes

Durante la primera mitad del siglo XX surgieron los primeros ferrocarriles con sistemas basculantes. Sin embargo, no fue hasta la década de 1970 cuando se consiguieron los avances tecnológicos necesarios para poder aplicar esta tecnología con seguridad y eficacia en trenes de alta velocidad. A partir de este periodo, empezaron a surgir trenes como el TALGO pendular (figura 2.34) en España (1980), los APT en el Reino Unido, los LRC en Canadá (1982), los primeros trenes ETR 450 Pendolino en Italia (1988), y el X2000 en Suecia (1990).

Desde la década de 1990, los sistemas basculantes se fueron consolidando convirtiéndose en una tecnología eficaz y fiable en todo el mundo, tanto en Europa como en Japón, razón por la cual en la actualidad todos los constructores de ferrocarriles ofrecen en sus catálogos modelos provistos de sistemas basculantes tanto para usos regionales como de alta velocidad [2].



Figura 2.34. Talgo 4 ó Talgo Pendular.

Es importante indicar la diferencia entre los trenes de tipo pendulares y los de tipo basculantes. Los trenes pendulares inclinan las cajas de los vehículos al tomar las curvas sin necesidad de aplicar sobre ellas ningún tipo de fuerza adicional, debido a que poseen el eje de balanceo del vehículo por encima del centro de gravedad del mismo (figura 2.35), lo cual hace que la fuerza centrífuga al tomar una curva provoque la inclinación de la caja hacia el interior de la curva.

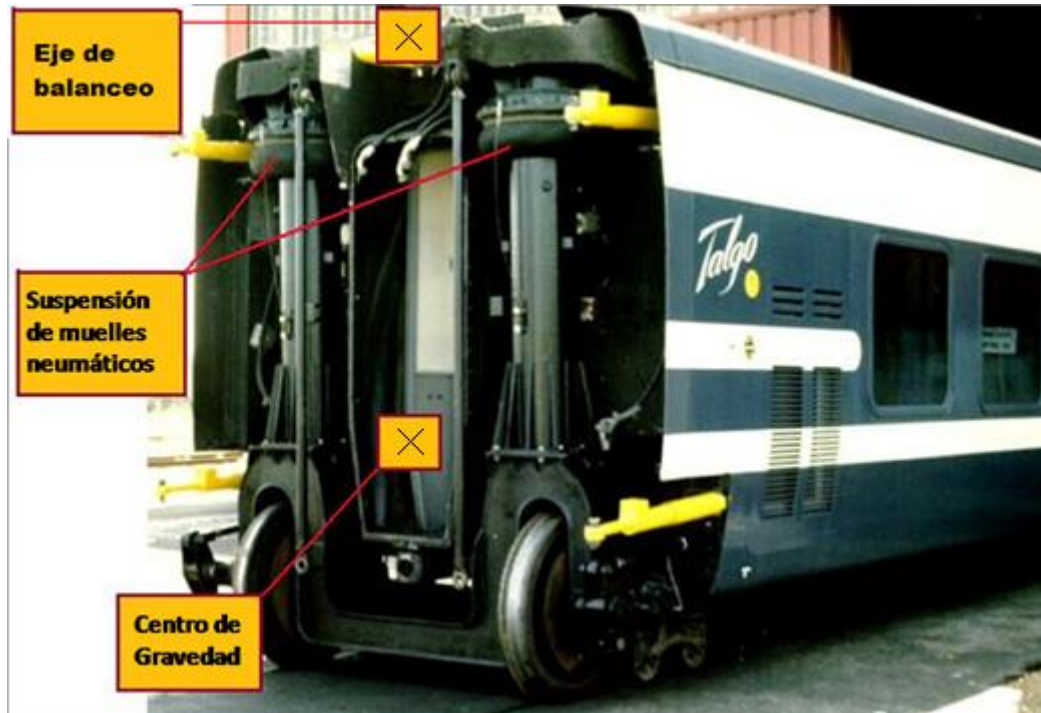


Figura 2.35. Esquema tren pendular.

Por otra parte, los trenes basculantes inclinan las cajas de forma forzada al circular por las curvas, mediante la utilización de sensores y la aplicación de fuerzas.

Las fuerzas que estos aplican pueden provenir tanto de actuadores neumáticos como de actuadores electro-hidráulicos, éstos últimos bastante más comunes de ver. Sin embargo, en los últimos años, se han empezado a utilizar actuadores de tipo electro-mecánicos, que constan de motores eléctricos que conducen tornillos fijados a los rodamientos que transforman el movimiento circular en lineal. Tras diversos experimentos realizados en Reino Unido, Suiza y Alemania entre los años 1970 y 1990, los actuadores electromecánicos son una clara alternativa a los convencionales actuadores electro-hidráulicos. Esto es debido a las diversas ventajas que proporcionan al sistema frente a los actuadores hidráulicos y pese a ser también menos compactos que estos últimos.

Estos actuadores, como se acaba de explicar, generalmente electro-mecánicos o electro-hidráulicos, van conectados a unas traviesas basculantes, las cuales se encuentran por debajo de la suspensión secundaria y conectada a ella, proporcionando de esta forma el movimiento de balanceo del vehículo [2].

2.3.2.2 Suspensiones activas secundarias

El uso del control activo en la suspensión secundaria mejora el confort y la dinámica del vehículo ferroviario en comparación con el uso de suspensiones pasivas convencionales. Normalmente, esto repercute en la capacidad del

vehículo ferroviario de circular a velocidades más elevadas de las normales sin sacrificar el confort de los ocupantes en ningún momento.

Los controles activos se pueden aplicar en todos y cada uno de los grados de libertad que posee la suspensión secundaria del vehículo ferroviario. Sin embargo, se ha de tener en cuenta que cuando el control activo se aplica al movimiento lateral del vehículo es obligatorio controlar también el movimiento de guiñado del mismo. Al igual que cuando se desea controlar el movimiento vertical del vehículo, también se debe controlar conjuntamente el movimiento de cabeceo del mismo.

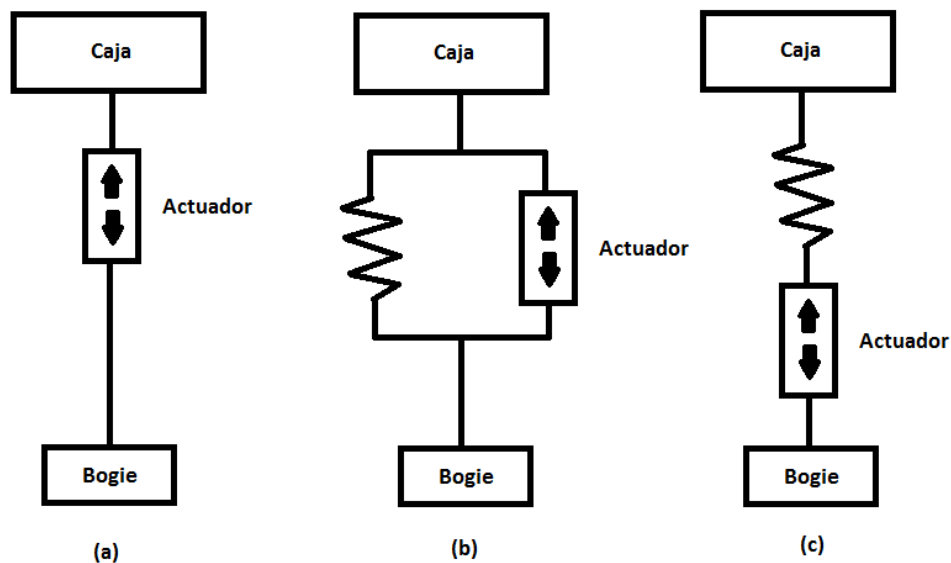


Figura 2.36. Configuraciones de actuadores en la suspensión secundaria activa.

Las configuraciones más comunes las suspensiones activas secundarias utilizadas para controlar tanto el movimiento lateral como el vertical se muestran en la figura 2.36. Como se puede observar en la configuración (a) de la figura 2.36, el actuador puede llegar a ser capaz de reemplazar totalmente a los componentes pasivos de la suspensión. En la práctica, sin embargo, esta configuración no es muy común, y se suele utilizar una configuración con el actuador y el componente pasivo colocados en paralelo (configuración (b) de la figura 2.36), debido a que el componente pasivo ayuda al actuador, disminuyendo la fuerza que ha de proporcionar el mismo y reduciendo su tamaño considerablemente. Por otra parte, la configuración (c) de la figura 2.36, en la cual el componente pasivo y el actuador van colocados en serie. Es la configuración que mejor trabaja a altas frecuencias, y por esta misma razón la configuración más eficiente que se puede obtener se consigue mediante la combinación de las configuraciones (b) y (c), es decir, un componente pasivo en paralelo con un actuador, y un último componente pasivo colocado en serie con ambos.

En cuanto al tipo de actuadores utilizados en las suspensiones activas secundarias, cabe destacar tres clases distintas de ellos. Por una parte están los actuadores neumáticos (figura 2.37), lo cuales, presentan una serie

desventajas, una de las más importante de ellas es su alto consumo de aire comprimido, algo que está limitado en los vehículos ferroviarios debido al gran número de dispositivos que funcionan de manera neumática tales como el sistema de frenos, puertas, control de altura mediante amortiguadores neumáticos, etc. Además, se ha de tener muy en cuenta que cuanto mayor sea la frecuencia a la que trabaja el amortiguador neumático, mayor es el consumo de aire comprimido del mismo [2].

Por lo tanto, para que los actuadores neumáticos trabajen correctamente se han de incorporar grandes compresores y depósitos de aire comprimido capaces de abastecer la gran demanda a la que estarán sometidos, lo cual es una solución bastante poco económica y eficiente.

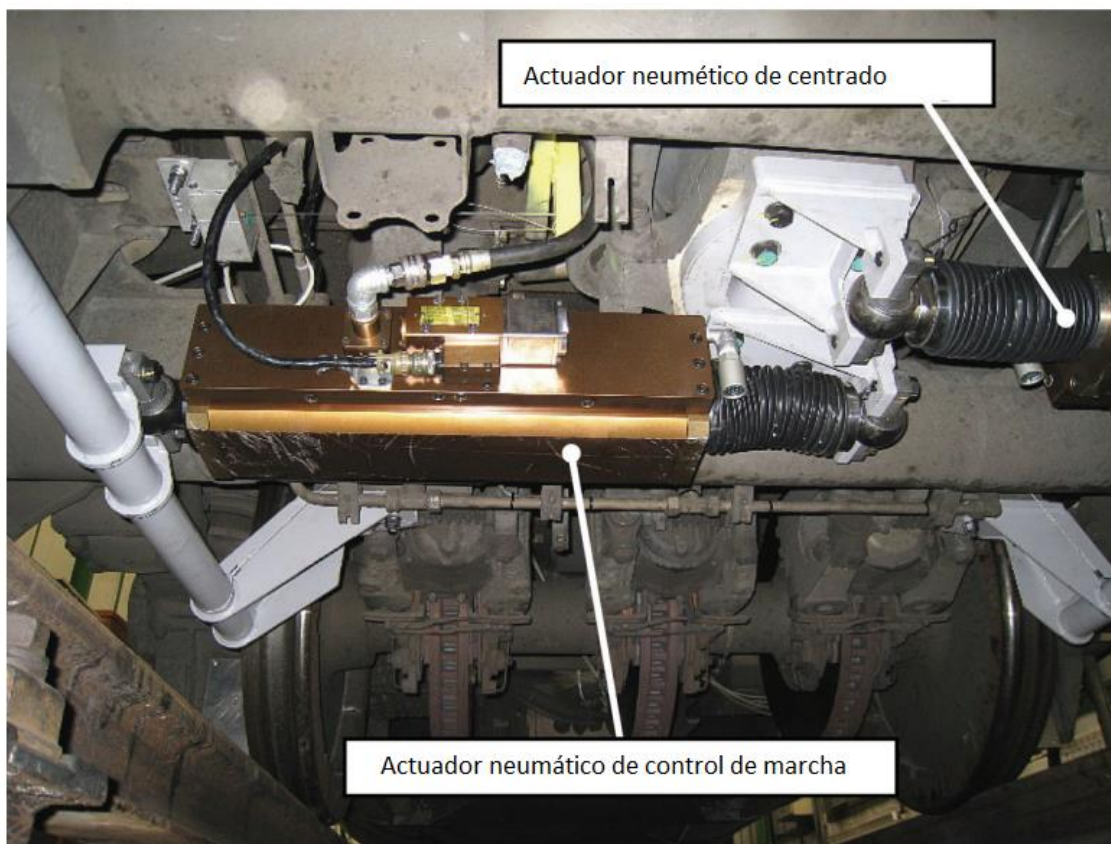


Figura 2.37. Actuador neumático.

Sin embargo, el problema del alto consumo de aire comprimido no es la única desventaja en el uso de actuadores neumáticos. Existe el problema, también, de su baja respuesta a altas frecuencias debida principalmente a la alta compresibilidad del aire, el cual, se ve agudizado cuando se circula a altas velocidades donde se demandan rápidas respuestas de los actuadores y las frecuencias aumentan.

Pese a todo lo anterior, en la actualidad el uso y desarrollo de actuadores neumáticos sigue presente, si bien es cierto que en muy bajo porcentaje. Empresas como por ejemplo, Nippon Steel & Sumitomo Metal, han estado, y prosiguen desarrollando actuadores neumáticos, consiguiendo grandes

avances y llegando a desarrollar actuadores a finales de 2003 que reducen el consumo de aire comprimido entre un 30 y un 50 % respecto a los actuadores convencionales [11].

En cuanto a los otros dos tipos de actuadores utilizados en las suspensiones secundarias activas, se pueden encontrar actuadores electro-hidráulicos y actuadores electro-mecánicos.

Los actuadores electro-hidráulicos constan de un motor eléctrico acoplado a una bomba hidráulica, por lo que no necesitan de un sistema hidráulico exterior. Son muy compactos y fáciles de acoplar pero, como, ya se explicó antes, su uso está más extendido en los sistemas basculantes que en las suspensiones secundarias.

En cuanto a los actuadores electro-mecánicos, disponen de motores eléctricos de alto rendimiento y convierten el movimiento rotacional de estos en movimiento lineal. La transformación del movimiento rotacional a lineal se realiza mediante tornillos de bolas o de rodillos (figura 2.38), siendo estos últimos los más utilizados debido a su mayor durabilidad.



Figura 2.38. Tornillo de rodillos y tornillo de bolas.

Tienen como inconvenientes su gran tamaño, y su baja fiabilidad y duración de sus componentes. Sin embargo, es uno de los tipos de actuadores más utilizados actualmente debido a poseer una tecnología muy implementada en el mundo del ferrocarril y al avance de la electrónica en los últimos años.

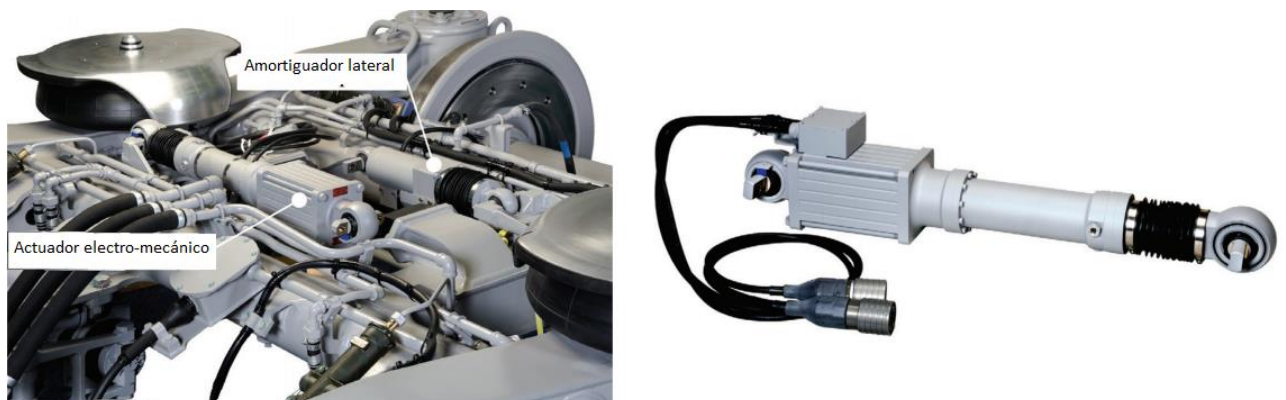


Figura 2.39. Actuador electro-mecánico.

Por último, se puede diferenciar un cuarto grupo de actuadores para las suspensiones secundarias, los actuadores electro-magnéticos (figura 2.39), son actuadores muy fiables y eficaces sobre todo para altas velocidades, pero su uso está muy limitado además de ser muy poco compactos y tener gran tamaño [2].

2.3.2.3 Suspensiones activas primarias

La aplicación del control activo en las suspensiones primarias de los vehículos ferroviarios es una idea bastante reciente, y que todavía tiene un gran margen de mejora, si bien se podía haber implementado desde hace varios años, sigue siendo un punto relativamente desconocido y poco utilizado [2].

El desarrollo de las suspensión activa primaria va encaminado a conseguir una mejora de la estabilidad en marcha del vehículo y un aumento de sus prestaciones en curva.

Existen distintos tipos de ejes en los vehículos ferrocarriles, dos de los tipos más comunes son los ejes montados y los ejes con rodales independientes. El control activo de la suspensión primaria puede montarse en ambos tipos de ejes.

El eje montado de un vehículo ferrocarril (conjunto de dos llantas perfiladas más un eje solido que une rígidamente ambas llantas), tiene la desventaja de moverse libremente de manera oscilatoria en el plano transversal en determinadas ocasiones, a este movimiento se le conoce como movimiento de lazo. La suspensión activa primaria, para este tipo de ejes, ha de proporcionar estabilidad y garantizar el funcionamiento correcto de la suspensión en curva.

Para ejes con rodales independientes, la suspensión activa primaria debe paliar pequeñas inestabilidades que se producen en este tipo de ejes. Sin embargo, la principal función de la suspensión primaria activa, tanto en ejes montados como en ejes con rodales independientes, es la de proporcionar la capacidad de controlar la dirección del eje para evitar que se trabaje sobre los rebordes de las llantas, llegando incluso a las pestañas.

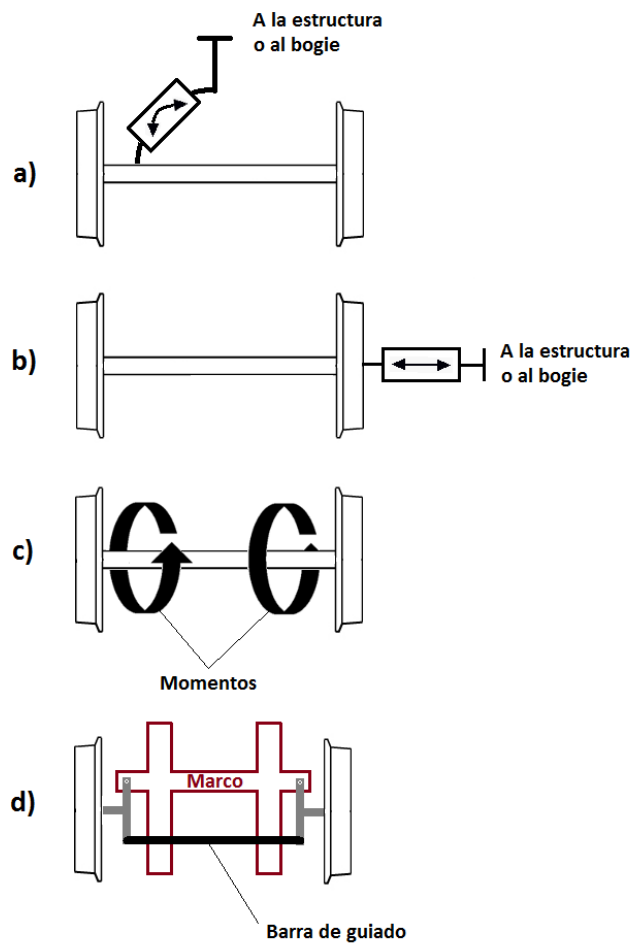


Figura 2.40. Configuraciones del actuador para la suspensión primaria.

En cuanto a la configuración, tipo y disposición de los actuadores de las suspensiones primarias activas, depende principalmente del tipo de eje que se disponga (figura 2.40). En ejes montados, se pueden colocar actuadores de guiñado, configuración (a) de la figura 2.40, de esta manera el sistema controla el par ejercido sobre el eje montado en las direcciones de guiñado. Otra opción es la configuración (b) de la figura 2.40, en la cual, se utilizan actuadores longitudinales, esta última configuración, tiene la desventaja de que las fuerzas de estabilización provocan un deterioro del confort de marcha del vehículo [2].

Por otra parte, para los ejes con rodales independientes, existen dos tipos de configuraciones. Una de ellas es la acoplación entre las ruedas de un sistema de momento torsor activo, configuración (c) de la figura 2.40, que permite aplicar momentos a ambas ruedas del eje controlando la dirección del mismo. Por último, existe la configuración (d) que se muestra en la figura 2.40, algo más radical que la anterior, en esta configuración se elimina el eje entre ambas ruedas y se sustituye por un marco, las fuerzas son de tipo transversal y se aplican directamente sobre una barra de guiado que proporciona la dirección adecuada a ambas llantas [2].

2.3.3 Suspensiones semi activas

Está claro que los mayores beneficios en cuanto a la dinámica del vehículo se obtienen mediante el uso de actuadores completamente controlables mediante su propia forma de energía (suspensiones activas). No obstante, una suspensión semi activa también puede lograr grandes beneficios en el comportamiento del vehículo ferroviario, a pesar de presentar dos grandes inconvenientes en su funcionamiento. Por un lado, la fuerza controlada que se puede aplicar depende de la velocidad de movimiento del actuador, normalmente el propio amortiguador, por lo tanto, a bajas velocidades de movimiento, la fuerza de la que se dispondrá será limitada. Por otra parte, y como consecuencia de no disponer de actuadores con su propia fuente de energía (figura 2.41), y de únicamente ser capaces de disiparla, es imposible realizar fuerzas positivas cuando la velocidad se invierte.

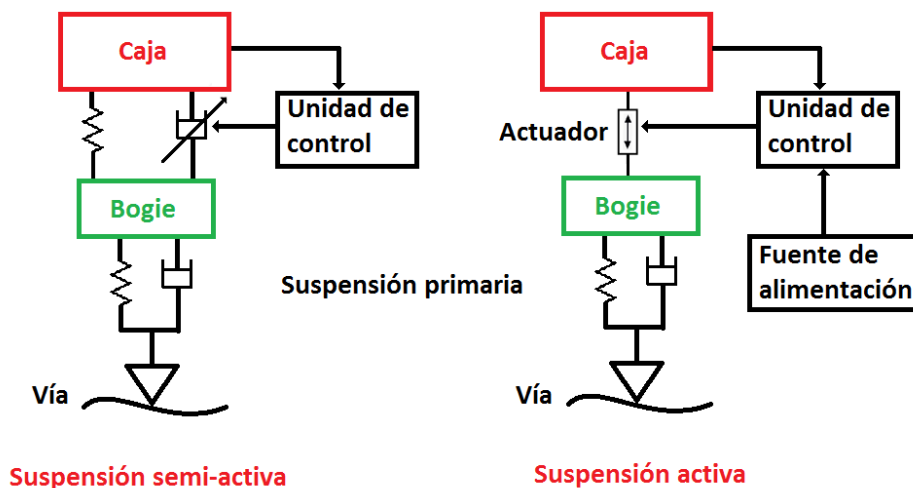


Figura 2.41. Control semi activo y completamente activo.

Sin embargo y, a pesar de dichas desventajas, las suspensiones semi activas poseen una gran ventaja, su simplicidad, y siguen proporcionando grandes mejoras en el comportamiento del vehículo a pesar de sus limitaciones, como su menor margen de amortiguamiento respecto a las activas.

Evidentemente, la unidad de control de la suspensión semi activa, al igual que en una suspensión activa, es un elemento decisivo en el buen funcionamiento de la misma. Por ello, el software utilizado como control es un punto de vital importancia en el funcionamiento de las suspensiones semi activas.

Por último, en cuanto a los actuadores que se pueden encontrar en las suspensiones semi activa, cabe destacar dos grandes grupos: los amortiguadores reológicos y los amortiguadores basados en electroválvulas. Los primeros contienen un fluido, el cual, posee la propiedad de modificar su viscosidad, además de otras propiedades, en función de hacer pasar una corriente eléctrica a través del fluido, o de la aplicación de un campo magnético

a través del mismo. Dependiendo del tipo de fluido utilizado, se aplica una clase de estímulo u otra.

Dichos estímulos, ya sean eléctricos o magnéticos son controlados por la unidad de control en función de los inputs que le llegan de cada uno de los sensores de la suspensión semi-activa, aplicando de esta forma fuerzas (siempre en función de la velocidad del amortiguador), capaces de modificar el comportamiento del vehículo ferroviario.

En cuanto a los amortiguadores basados en electroválvulas, disipan energía al hacer pasar un fluido de una cámara a otra mediante una serie de orificios, las electroválvulas abren o cierran unos conductos que comunican las distintas cámaras regulando de esta forma la fuerza que realiza el amortiguador en función de la velocidad del mismo.

En la figura 2.42 se muestra el esquema general de un amortiguador basado en electroválvulas. En él, se pueden observar las distintas cámaras (A, B y C), los orificios H y I que comunican las cámaras A y B, los orificios J y K que comunican las cámaras B y C, y los dos conductos controlados mediante electroválvulas de distinto tamaño que comunican únicamente las cámaras A y C en [2].

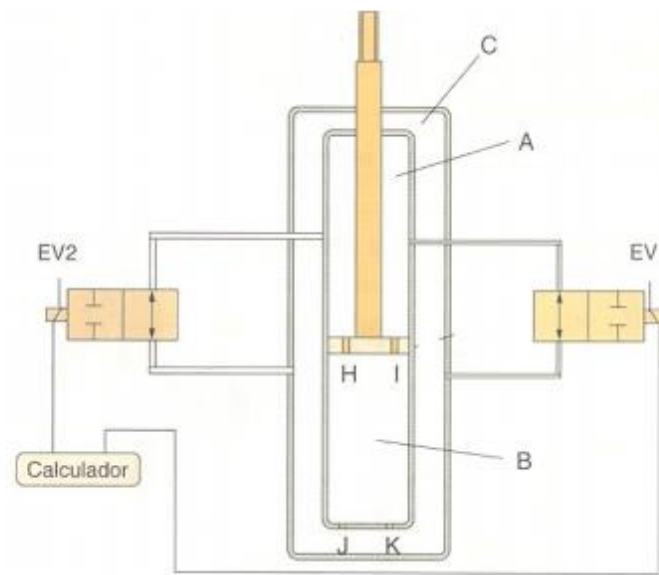


Figura 2.42. Esquema amortiguador basado en electroválvulas.

Capítulo 3. Lógica difusa y estabilidad lateral de un vehículo ferroviario

Este tercer capítulo está dividido en dos partes bien diferenciadas, la primera de ellas muestra conceptos sobre el funcionamiento básico de la lógica difusa, y se hace una breve reseña histórica sobre la aparición y evolución de la lógica difusa a lo largo del tiempo.

La segunda parte de este capítulo muestra conceptos sobre la dinámica y la estabilidad de un vehículo ferroviario.

3.1 Lógica difusa

3.1.1 Introducción histórica

El concepto de lógica difusa, o también conocida como lógica borrosa, fue concebido por Lotfi Zadeh, un profesor universitario en California. Inicialmente no fue desarrollada como un método de control, sino más bien como un método de tratamiento de datos, al permitir como novedad la distribución de estos en conjuntos parciales y no en los clásicos conjuntos a los que se les asignaba o no la pertenencia.

No fue hasta los años 70 cuando, gracias al desarrollo de la informática y sus procesadores, se empezó a utilizar la lógica difusa como método de control. El profesor Zadeh razonó que el ser humano es capaz de tomar decisiones con gran precisión y efectividad si tener la necesidad de recibir información precisa (valor numérico exacto). De esta forma, se dio cuenta de que si se pudiese desarrollar un controlador que aceptase como entrada información imprecisa y con mucho ruido sin perder precisión en su respuesta, se lograrían obtener controladores mucho más efectivos y fáciles de implementar un gran número de sistemas.

Sin embargo la industria estadounidense no fue muy pionera en el desarrollo de controladores mediante el uso de lógica borrosa, y sus rivales, tanto europeos como japoneses, reaccionaron mucho más rápido ante ésta nueva tecnología [3].

3.1.2 Funcionamiento de la lógica difusa

La lógica difusa se basa en una lógica muy sencilla que trata de imitar en todo momento al comportamiento lógico humano. Para ello, se basa en la utilización de variables lingüísticas o grupos, para describir mediciones, y las clasifica en distintos niveles en función del valor recibido de éstas, en lugar de utilizar manipulaciones matemáticas muy tediosas y complejas.

Así pues, el algoritmo de la lógica borrosa trata de imitar razonamientos humanos sencillos como, por ejemplo, cuando una persona intenta regular la temperatura de salida del agua de un grifo. Si ésta comprueba que el agua está

demasiada fría, abre la válvula del agua caliente, si el agua se vuelve demasiado caliente para su gusto, trata de abrir la válvula del agua fría, y así sucesivamente. Este tipo de procedimientos son los que la lógica difusa trata de imitar, pero de una forma más rápida y veloz.

Siguiendo con el ejemplo expuesto de la temperatura del agua a la salida de un grifo, el algoritmo de lógica borrosa para desarrollar un controlador de esta temperatura se fundamentará inicialmente, en la asociación de las señales de entrada con variables lingüísticas, o grupos, que definen los estados en los que se encuentra la señal de entrada (agua muy fría, agua un poco fría, agua un poco caliente, etc.).

Cada uno de los grupos, lleva asociado un rango de valores predeterminado (rango de temperatura en el ejemplo que se ha expuesto). Así pues, según el valor de la señal recibida (temperatura), se le asigna un grupo u otro (figura 3.1). Para valores de entrada situados entre los 10 y los 14 °C, se les asigna el grupo MF (Agua muy fría) ya sea de manera total, o de manera parcial. Por ejemplo, para un valor de entrada de 11 °C, el punto de intersección con el grupo MF está en 0,5, lo cual indica una pertenencia parcial al grupo MF, si el valor fuera de 1, la pertenencia al grupo MF sería total.

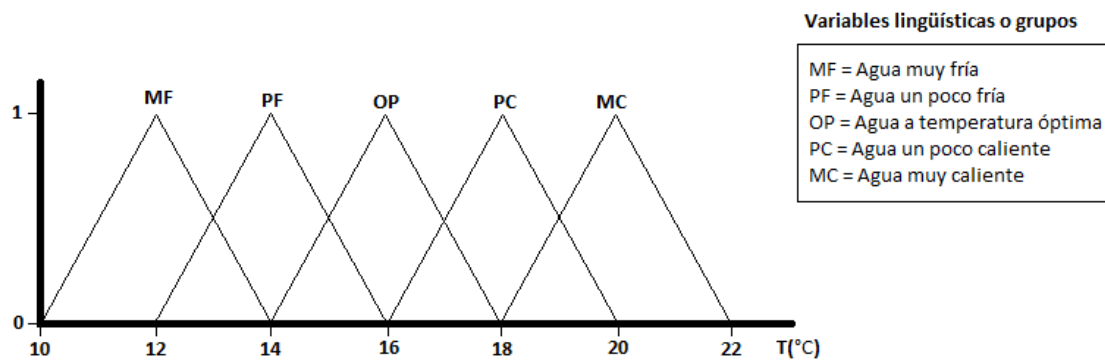


Figura 3.1. Temperatura del agua a la salida del grifo.

De forma análoga ocurre con la señal de salida del controlador (figura 3.2). Ésta también se asocia con distintos grupos en función del valor de la señal, que en este caso, al tratarse de la señal de salida, en vez de ser la temperatura, es el caudal de agua ya sea fría o caliente, (mucha agua caliente, poca agua caliente, poca agua fría, etc.).

Se escoge como señal de salida el caudal de agua fría o caliente y no cualquier otro, debido a que lógicamente, éste es el parámetro fundamental que permite variar la señal de entrada del controlador (temperatura del grifo).

Nótese también que, como se puede observar en la figura 3.2, el rango de la señal de salida del controlador está entre -0,15 y 0,15 litros por segundo, siendo los valores con signo negativos referidos a caudales de agua fría y los valores con signo positivo referidos a caudales de agua caliente.

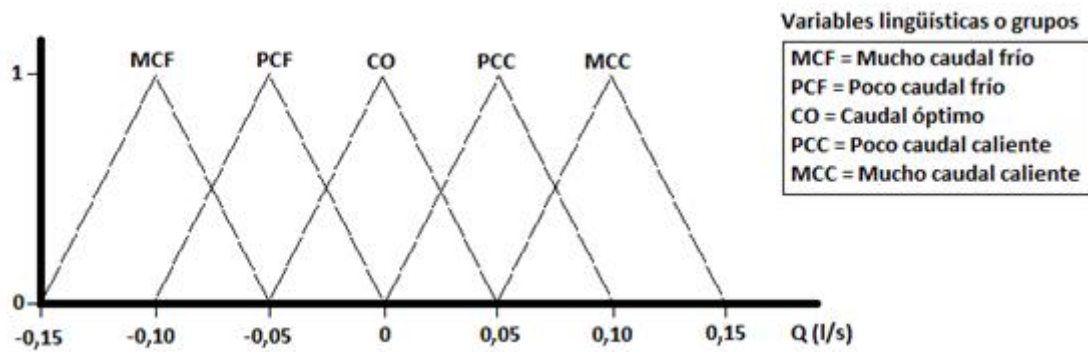


Figura 3.2. Caudal de agua fría y caliente.

Una vez establecidas las distintas variables lingüísticas tanto para la entrada como para la salida, queda por definir una serie de reglas básicas que determinan al algoritmo de lógica difusa final y repercuten en el funcionamiento del controlador.

En función de cómo se desee que sea la respuesta del controlador, se pueden especificar unas reglas básicas u otras. Por esta razón, la elección de las reglas básicas del algoritmo de lógica borrosa es algo que repercute muy directamente en el comportamiento del controlador, y se debe de estar muy seguro de que son las adecuadas para el correcto funcionamiento del mismo, lo cual, puede llegar a ser una tarea compleja y que lleva su tiempo y estudio.

Para el ejemplo del grifo de agua, se van a establecer unas reglas básicas generales que, a priori, no debería presentar un comportamiento erróneo del controlador (tabla 3.1). Evidentemente, cuantas más entradas y salidas tenga el controlador, mayor será el número de reglas básicas que posea el algoritmo de lógica borrosa, y será mucho más complejo establecer las reglas adecuadas para el perfecto funcionamiento del controlador. En este caso de ejemplo, al tener únicamente una salida y una entrada, el proceso de establecer las reglas básicas de comportamiento es bastante sencillo.

Tabla 3.1. Reglas básicas del algoritmo de lógica borrosa.

Reglas básicas	Temperatura a la salida del grifo	Caudal de agua
Regla 1	MF	MCC
Regla 2	PF	PCC
Regla 3	OP	CO
Regla 4	PC	PCF
Regla 5	MC	MCF

Una vez se tienen establecidas todas las variables lingüísticas y todas las reglas básicas que las relacionan, ya está establecido por completo el funcionamiento del algoritmo de lógica borrosa. Llegado a este punto, para comprobar como sería el funcionamiento del controlador y entender cómo funciona un algoritmo de lógica difusa, se procede a mostrar cómo sería el proceso de actuación en un ciclo completo del controlador:

- **Paso 1:** Partiendo de un valor de entrada de, por ejemplo, 13 °C (valor de la temperatura a la salida del grifo en el instante inicial) el algoritmo de lógica difusa asocia dicho valor de temperatura con las variables lingüísticas MF y PF, hallando a su vez, la componente vertical del punto de intersección con ambos grupos, que en este caso es de 0,5 tanto para el grupo MF, como para el grupo PF (figura 3.3).

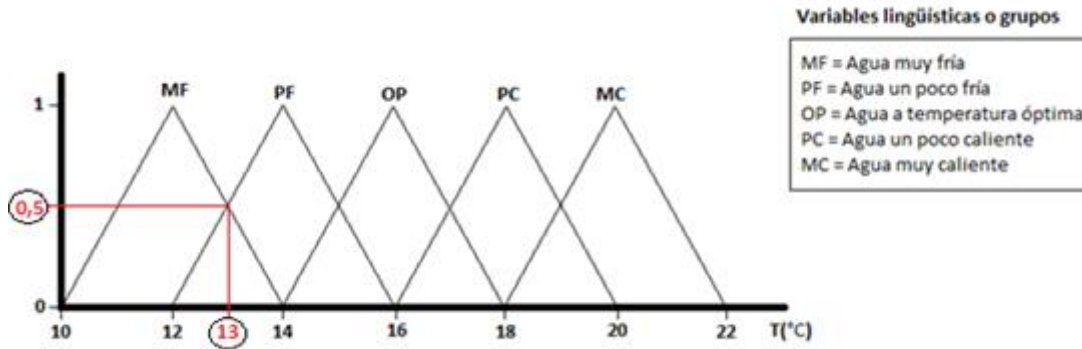


Figura 3.3. Asociación de las variables lingüísticas MF y PF con un valor de temperatura del agua de 13°C.

- **Paso 2:** Hallados los puntos de intersección, se modifica la altura de los triángulos correspondientes y se halla su área total (figura 3.4), en este caso, los pertenecientes a los grupos MCC y PCC, puesto que son los grupos relacionados con los grupos iniciales MF y PF mediante las reglas básicas establecidas en la anterior tabla 1. Los triángulos se modifican de tal forma que conserven su base, pero su altura coincida con la componente vertical del punto de intersección entre cada uno de los grupos de la señal de entrada y el valor de la señal de entrada en cada momento (0,5 para ambos grupos en este caso).

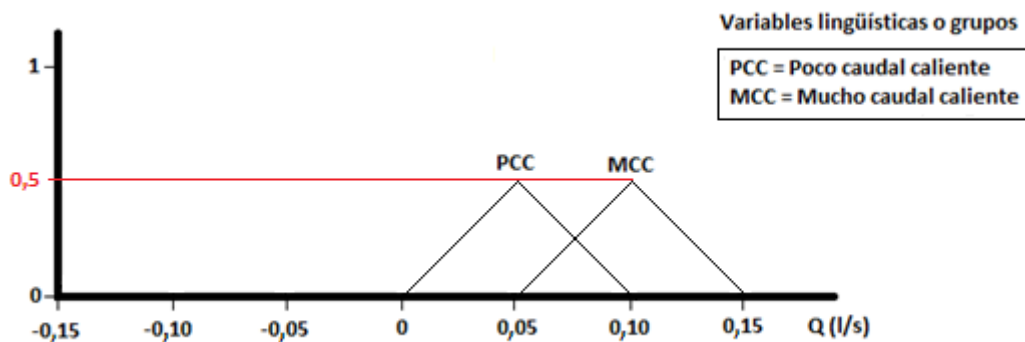


Figura 3.4. Modificación de los triángulos de los grupos PCC y MCC.

Una vez modificada la altura de los triángulos correspondientes a los grupos PCC y MCC, el área de los mismos pasa a tener un valor de 0.025 para ambos grupos.

- **Paso 3:** Por último, solo falta obtener la señal de salida final, para ello se ha de hallar la posición exacta, en el eje horizontal, del punto P, para lo cual se halla el valor de las cotas D1 y D2 representadas en la figura 3.5.

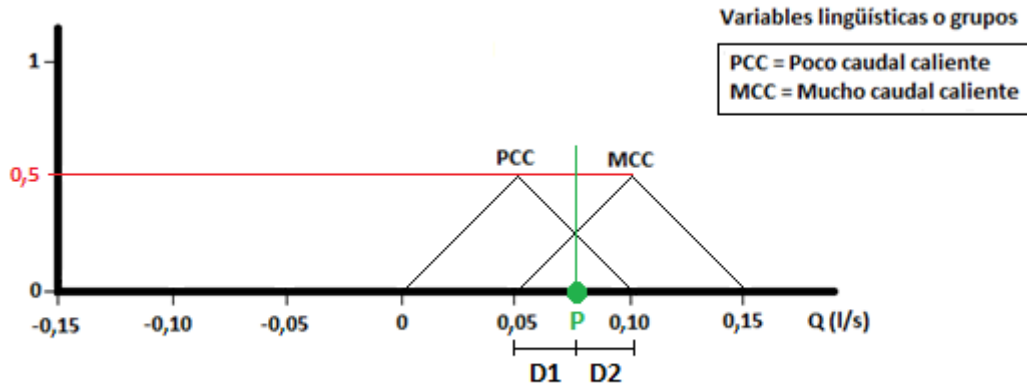


Figura 3.5. Obtención de la señal de salida.

Dicho punto P representa el lugar donde se debería de colocar el punto de apoyo para conseguir el equilibrio en un virtual sistema balancín con una carga en uno de sus extremos igual al valor del área calculada anteriormente del grupo PCC, y con otra carga en el extremo opuesto, igual al área calculada anteriormente perteneciente al grupo MCC (figura 3.6).

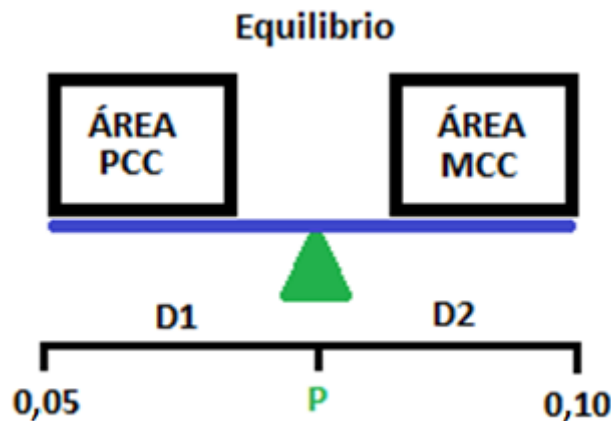


Figura 3.6. Sistema virtual para la obtención de P

En este caso particular, al disponer de áreas iguales en ambos grupos, el cálculo de la posición del punto P es inmediato. Sin embargo, normalmente no es así, y se debería de proceder a realizar el breve cálculo del siguiente sistema a partir de las ecuaciones 5.1 y 5.2.

$$A_{PCC} \cdot D_1 = A_{MCC} \cdot D_2 \quad (5.1)$$

$$D_1 + D_2 = 0.10 - 0.05 \quad (5.2)$$

dónde:

- $A_{PCC} = \text{Valor del área del grupo PCC}$
- $A_{MCC} = \text{Valor del área del grupo MCC}$
- $D_1 = \text{Cota del punto P al valor 0,05}$
- $D_2 = \text{Cota del punto P al valor 0,15}$

Resolviendo:

$$0.025 \cdot D_1 = 0.025 \cdot D_2 \rightarrow D_1 = D_2 = D$$

$$D + D = 0.10 - 0.05 \rightarrow D = 0,025$$

Por lo tanto, viendo el resultado obtenido anteriormente para la posición del punto “P” de 0,025, se deduce que la señal de salida que emite el controlador para una temperatura del agua del grifo de 13 °C es de 0.025, lo cual corresponde con un caudal de 0.025 l/s de agua caliente (al tener signo positivo).

Este proceso que se acaba de mostrar en estos tres pasos anteriores, sobre como actuaría el algoritmo de lógica difusa una vez establecidas su variables lingüísticas de entrada y de salida, y todo el conjunto de reglas básicas, se repetiría una y otra vez hasta conseguir la temperatura adecuada a la salida del grifo, y es la base fundamental de cualquier controlador basado en lógica difusa.

A partir de aquí, el algoritmo de lógica borrosa puede complicarse de manera considerable aumentando el número de estradas y/o de salidas del controlador, y modificando el conjunto de reglas básicas (el cual se incrementa al aumentar el número de entradas y salidas del controlador) hasta obtener la respuesta deseada del controlador en todo momento.

3.2 Estabilidad lateral de un vehículo ferroviario

La estabilidad lateral de un vehículo ferroviario es un punto muy importante en su comportamiento, afecta tanto al confort, como a la seguridad y a las prestaciones del mismo.

La velocidad a la cual comienzan a aparecer inestabilidades laterales se conoce como velocidad crítica, y es la máxima velocidad que puede alcanzar el vehículo ferroviario en condiciones de máxima seguridad.

En condiciones de velocidad crítica, el estudio de la estabilidad lateral del tren se puede limitar al estudio de un único bogie del vehículo ferroviario, sin cometer grandes errores en los cálculos y con mucha precisión. Sin embargo,

para velocidades muy altas, se ha de tener en cuenta el efecto de todos y cada uno de los bogies del vehículo, ya que la aproximación anterior no es acertada.

Dentro de la estabilidad lateral se pueden distinguir dos grandes grupos en función de por donde esté circulando el tren. Así pues, no es igual el comportamiento referido a la estabilidad lateral del tren cuando éste está circulando por un tramo recto, que cuando está circulando por un tramo curvo. A continuación, se exponen detalladamente ambos casos.

3.2.1 Estabilidad lateral en tramos rectos

La estabilidad lateral en tramos rectos está comprometida principalmente por el conocido como movimiento de lazo (figura 3.7). El movimiento de lazo consiste en la trayectoria que describe un eje montado cuando circula libre por la vía y es separado de su posición central. El origen de dicha descolocación del eje montado, es debido a la conicidad presente en el perfil de las ruedas, la cual, provoca la variación del radio de rodadura de las ruedas cuando el eje se desplaza lateralmente respecto a la vía.

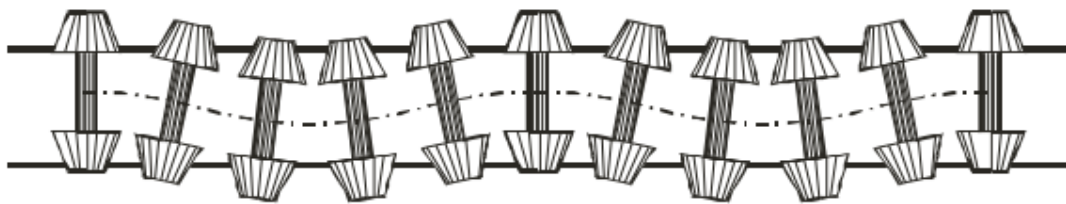


Figura 3.7. Movimiento de lazo.

El eje montado como sólido rígido posee seis grados de libertad, sin embargo, al circular sobre los raíles sus grados de libertad disminuyen a dos. El movimiento de translación en la dirección del eje Z (figura 3.8) y el movimiento de rotación entorno al eje X que provoca el balanceo se consideran normalmente como dependientes el uno del otro, además, el movimiento de translación en la dirección del eje X y el movimiento de rotación entorno al eje Y se consideran relacionados el uno con el otro en todo momento, siempre que se desprecie cualquier tipo de deslizamiento entre la rueda y rail.

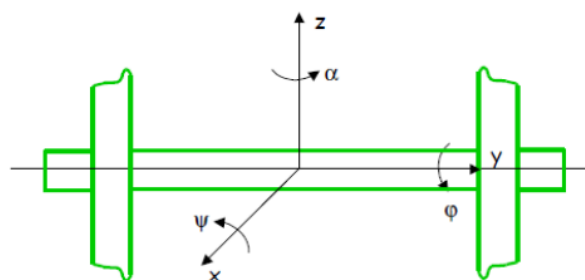


Figura 3.8. Ejes de referencia en el eje montado.

La ecuación que describe el comportamiento del eje montado durante el movimiento de lazo es la conocida como “Ecuación de Klingel” y fue formulada en 1883.

A continuación, y partiendo del esquema de la conicidad de un eje montado que se muestra en la figura 3.9, se obtienen las ecuaciones 5.3 y 5.4 y se muestra el procedimiento para la obtención de la ecuación de Klingel [14].

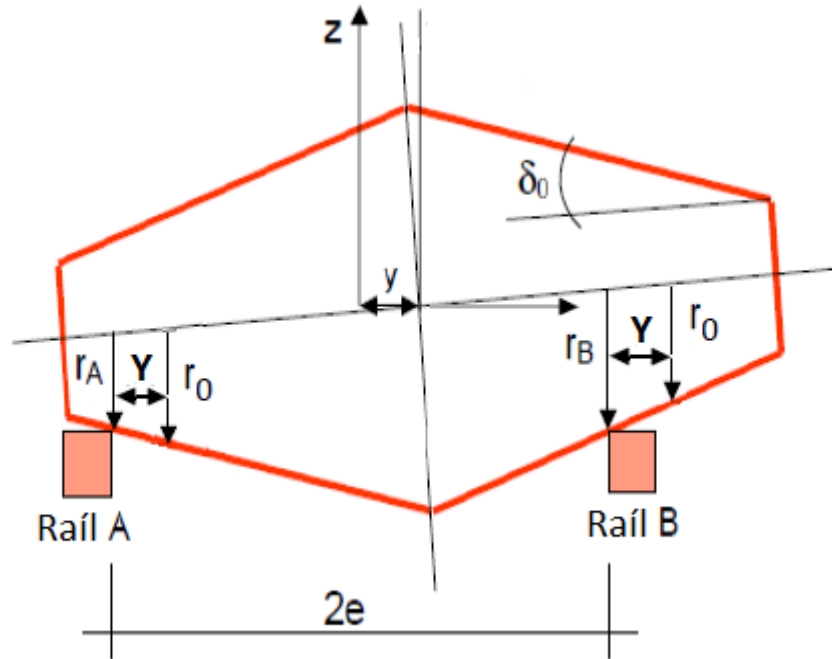


Figura 3.9. Esquema de conicidad de un eje montado.

La distancia, cuando hay movimiento de lazo, del centro del eje al punto de contacto entre la rueda y el raíl B se obtiene de la ecuación:

$$r_B = r_o + Y \cdot \tan(\delta_o) \quad (5.3)$$

dónde:

- r_o = Distancia en reposo del centro del eje al punto de contacto entre la rueda y el raíl, en el eje Z [m].
- r_B = Distancia, cuando hay movimiento de lazo, del centro del eje al punto de contacto entre la rueda y raíl B, en el eje Z [m].
- Y = Desplazamiento del punto de contacto entre el raíl y la rueda en el eje Y [m].
- δ_o = Conicidad de la rueda [rad].

La distancia, cuando hay movimiento de lazo, del centro del eje al punto de contacto entre la rueda y el raíl A se obtiene de la ecuación:

$$r_A = r_o - Y \cdot \tan(\delta_o) \quad (5.4)$$

dónde:

- r_o = Distancia en reposo del centro del eje al punto de contacto entre la rueda y el raíl, en el eje Z [m].
- r_A = Distancia, cuando hay movimiento de lazo, del centro del eje al punto de contacto entre la rueda y raíl A, en el eje Z [m].
- Y = Desplazamiento del punto de contacto entre el raíl y la rueda en el eje Y [m].
- δ_o = Conicidad de la rueda [rad].

Teniendo en cuenta que el ángulo correspondiente con la conicidad es muy pequeño:

$$\tan(\delta_o) \simeq \delta_o \rightarrow \begin{cases} r_B = r_o + Y \cdot \tan(\delta_o) \simeq r_o + Y \cdot \delta_o \\ r_A = r_o - Y \cdot \tan(\delta_o) \simeq r_o - Y \cdot \delta_o \end{cases}$$

$$\text{Conicidad} \rightarrow \delta_o = \frac{r_B - r_A}{2 \cdot Y} \quad (5.5)$$

Además, junto al esquema de velocidades de la figura 3.10, se puede obtener las ecuaciones 5.6, 5.7, 5.8 y 5.9:

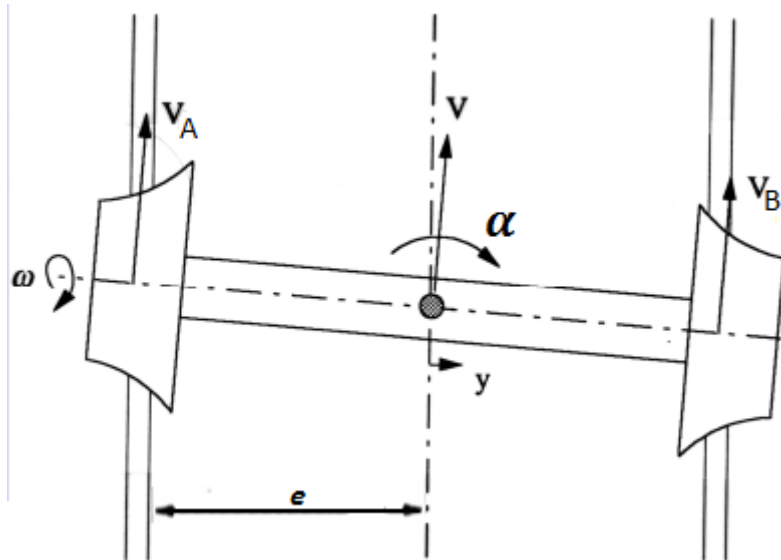


Figura 3.10. Esquema de velocidades de un eje montado en tramo recto.

Las velocidades lineales tanto de la rueda A como de la rueda B son las siguientes:

$$V_A = \omega \cdot r_A = \omega \cdot (r_o - Y \cdot \delta_o) \quad (5.6)$$

$$V_B = \omega \cdot r_B = \omega \cdot (r_o + Y \cdot \delta_o) \quad (5.7)$$

dónde:

- V_A = Velocidad lineal en la rueda A [m/s].
- V_B = Velocidad lineal en la rueda B [m/s].
- ω = Velocidad de rotación del eje montado [rad/s].
- r_o = Distancia en reposo del centro del eje al punto de contacto entre la rueda y el raíl, en el eje Z [m].
- r_B = Distancia, cuando hay movimiento de lazo, del centro del eje al punto de contacto entre la rueda y raíl B, en el eje Z [m].
- r_A = Distancia, cuando hay movimiento de lazo, del centro del eje al punto de contacto entre la rueda y raíl A, en el eje Z [m].
- Y = Desplazamiento del punto de contacto entre el raíl y la rueda en el eje Y [m].
- δ_o = Conicidad de la rueda [rad].

La velocidad lineal en el punto medio del eje obtenida a partir de la **figura 3.10** es:

$$V = \frac{V_B + V_A}{2} = \omega \cdot r_o \quad (5.8)$$

dónde:

- V_A = Velocidad lineal en la rueda A [m/s].
- V_B = Velocidad lineal en la rueda B [m/s].
- ω = Velocidad de rotación del eje montado [rad/s].
- r_o = Distancia en reposo del centro del eje al punto de contacto entre la rueda y raíl B, en el eje Z [m].

La ecuación de la velocidad angular de lazo obtenida del esquema de la figura 3.10 es:

$$\frac{d\alpha}{dt} = \frac{V_A - V_B}{2 \cdot e} \quad (5.9)$$

dónde:

- V = Velocidad lineal en el punto medio del eje [m/s].
- $\frac{d\alpha}{dt}$ = Velocidad de rotación del eje sobre el eje Z [rad/s].
- V_A = Velocidad lineal en la rueda A [m/s].
- V_B = Velocidad lineal en la rueda B [m/s].
- e = Mitad de la distancia entre los planos de rodadura [m].

Suponiendo como datos conocidos r_o, e , y δ_o , la velocidad angular de lazo se puede calcular de la siguiente manera:

$$\begin{aligned} \frac{d\alpha}{dt} &= \frac{V_A - V_B}{2 \cdot e} = \frac{\omega \cdot (r_o - Y \cdot \delta_o) - \omega \cdot (r_o + Y \cdot \delta_o)}{2 \cdot e} = -\omega \cdot Y \cdot \frac{\delta_o}{e} \\ \omega &= \frac{V}{r_o} \rightarrow \frac{d\alpha}{dt} = -V \cdot \frac{\delta_o \cdot Y}{r_o \cdot e} \end{aligned}$$

Sabiendo que:

$$\left. \begin{aligned} \frac{dy/dt}{dx/dt} &= \frac{dy}{dx} \rightarrow \frac{dy/dt}{V} = \frac{dy}{dx} \\ \frac{d\alpha/dt}{dx/dt} &= \frac{d\alpha}{dx} \rightarrow \frac{d\alpha/dt}{V} = \frac{d\alpha}{dx} \end{aligned} \right\} \rightarrow \begin{cases} \frac{dy}{dx} = \alpha \\ \frac{d\alpha}{dx} = -\delta_o \cdot \frac{Y}{r_o \cdot e} \end{cases}$$

De las dos deducciones anteriores se obtiene la siguiente ecuación diferencial:

$$\begin{aligned} \frac{d\alpha}{dx} + Y \cdot \frac{\delta_o}{r_o \cdot e} &= 0 \rightarrow \alpha = \frac{dy}{dx} \rightarrow \\ \frac{d^2y}{dx^2} + Y \cdot \frac{\delta_o}{r_o \cdot e} &= 0 \end{aligned}$$

Resolviendo la ecuación diferencial de segundo orden:

$$\begin{aligned} \frac{d^2y}{dx^2} + Y \cdot \frac{\delta_o}{r_o \cdot e} &= 0 \rightarrow p^2 + \frac{\delta_o}{r_o \cdot e} = 0 \rightarrow p = \pm i \cdot \sqrt{\frac{\delta_o}{r_o \cdot e}} \rightarrow \\ y &= A \cdot \cos(p \cdot x + \beta) \rightarrow y = A \cdot \sqrt{\frac{\delta_o}{r_o \cdot e}} + \beta \end{aligned}$$

Finalmente, derivando respecto a “x” la solución anterior obtenida, se obtiene la Ecuación de Klingel:

$$\frac{dy}{dx} = \alpha = -A \cdot \sqrt{\frac{\delta_o}{r_o \cdot e}} \cdot \text{sen} \left(x \cdot \sqrt{\frac{\delta_o}{r_o \cdot e}} + \beta \right) \quad (5.10)$$

La ecuación de Klingel, que describe el movimiento de lazo mediante una función sinusoidal, cuyo eje Y representa la rotación del eje respecto al eje “Y”, y el eje X la posición longitudinal se muestra en la figura 3.11 [14].

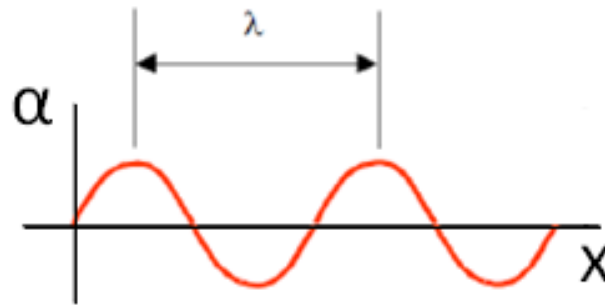


Figura 3.11. Ecuación sinusoidal de Klingel.

3.2.2 Estabilidad lateral en tramos curvos

A parte de la evidente fuerza centrífuga que sufre el vehículo ferroviario al atravesar un tramo curvo, proporcional al radio de curvatura de la vía y la velocidad y masa del vehículo ferroviario, existen más factores que alteran la estabilidad del mismo mientras se encuentra circulando por un tramo curvo.

Uno de los factores que provocan la desestabilización lateral del vehículo ferroviario al circular por un tramo curvo, es el desplazamiento lateral que sufre el mismo debido al perfil cónico de las ruedas. Dicho desplazamiento se puede calcular mediante el análisis vectorial que aparece en las figuras 3.12 y 3.13 de un eje montado ferroviario

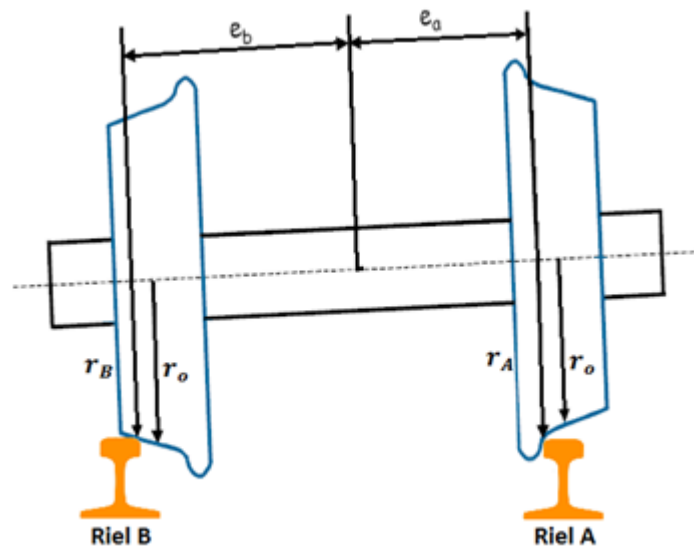


Figura 3.12. Esquema de cotas eje montado.

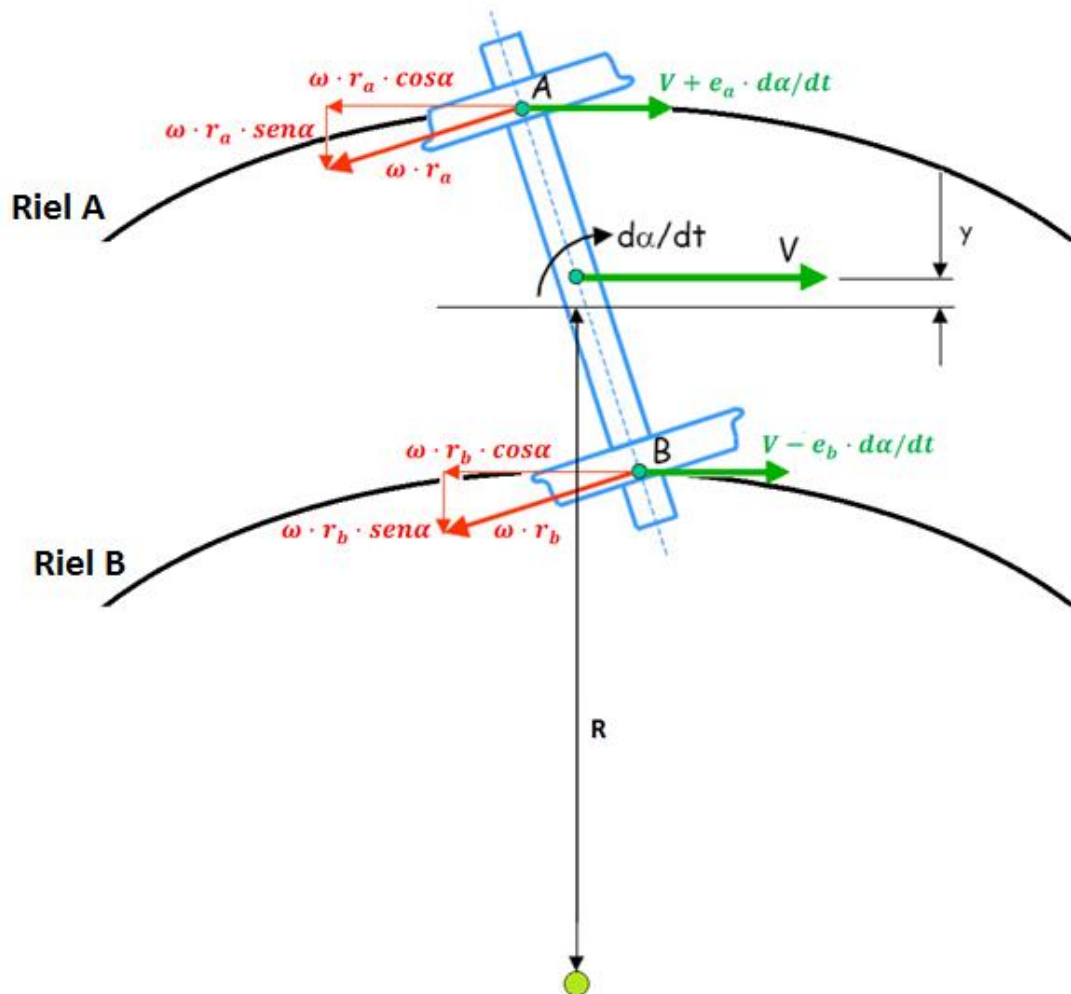


Figura 3.13. Esquema velocidades de un eje montado en tramo curvo.

Las velocidades en el eje X, tanto en el punto A como en el punto B son las siguientes:

$$V_{Ax} = V + \frac{e_a \cdot V}{R} - \omega \cdot r_a \cdot \cos \alpha \quad (5.11)$$

$$V_{Bx} = V - \frac{e_b \cdot V}{R} - \omega \cdot r_b \cdot \cos \alpha \quad (5.12)$$

dónde:

- e_a = Distancia, en la dirección paralela al eje de revolución del eje montado, desde el punto medio del eje, hasta el punto de contacto entre la rueda y el raíl A [m].
- e_b = Distancia, en la dirección paralela al eje de revolución del eje montado, desde el punto medio del eje, hasta el punto de contacto entre la rueda y el raíl B [m].
- y = Desplazamiento del punto medio del eje en el eje Y [m].
- V = Velocidad lineal en el punto medio del eje [m/s].
- R = Radio de curvatura [m].
- V_{Ax} = Velocidad lineal en la rueda A en el eje X [m/s].
- V_{Bx} = Velocidad lineal en la rueda B en el eje X [m/s]
- V = Velocidad lineal en el punto medio del eje [m/s].
- α = Ángulo de translación del eje sobre el eje Z [rad].
- ω = Velocidad de rotación del eje montado [rad/s].
- r_B = Distancia, cuando hay movimiento de lazo, del centro del eje al punto de contacto entre la rueda y raíl B, en el eje Z [m].
- r_A = Distancia, cuando hay movimiento de lazo, del centro del eje al punto de contacto entre la rueda y raíl A, en el eje Z [m].

Considerando que el eje está en todo momento orientado radialmente respecto a la curva, (se supone que el eje montado no va montado en un bogie):

$$\alpha = 0$$

Sumando las velocidades lineales en el eje X de la rueda A y de la rueda B, e igualando a cero, se obtiene la velocidad de rotación del eje:

$$V_{Ax} + V_{Bx} = 0 \rightarrow \omega = V \cdot \frac{2 + \frac{e_a - e_b}{R}}{r_a + r_b} \quad (5.13)$$

Además, teniendo en cuenta que el desplazamiento del punto de contacto entre la rueda y el rail en el eje Y es despreciable en ambas ruedas, la ecuación anterior 5.13 se puede aproximar a la ecuación siguiente 5.14

$$\text{Considerando} \rightarrow e_a - e_b \simeq 0 \rightarrow \omega \simeq \frac{2 \cdot V}{r_a + r_b} \quad (5.14)$$

Restando la velocidad lineal en el eje X de la rueda A a la de la rueda B, e igualando a cero, se obtiene la siguiente ecuación 5.15:

$$V_{Ax} - V_{Bx} = 0 \rightarrow r_a - r_b = \frac{(e_a + e_b)}{R} \cdot \frac{r_a + r_b}{2} \quad (5.15)$$

Teniendo en cuenta que la distancia entre planos de rodadura permanece constante, pese a estar circulando el vehículo por una curva, y además, asumiendo que el valor de r_o es la media aproximada de los valores de r_a y r_b , se obtiene la ecuación 5.16 a partir de la ecuación anterior 5.15.

$$\text{Considerando} \rightarrow \begin{cases} \frac{r_a + r_b}{2} \simeq r_o \\ e_a + e_b = 2 \cdot e \end{cases}$$

$$r_a - r_b = \frac{2 \cdot e \cdot r_o}{R} \quad (5.16)$$

dónde:

- r_B = Distancia, cuando hay movimiento de lazo, del centro del eje al punto de contacto entre la rueda y raíl B, en el eje Z [m].
- r_A = Distancia, cuando hay movimiento de lazo, del centro del eje al punto de contacto entre la rueda y raíl A, en el eje Z [m].
- R = Radio de curvatura [m].
- r_o = Distancia en reposo del centro del centro del eje al punto de contacto entre la rueda y el raíl, en el eje Z [m].
- e = Mitad de la distancia entre los planos de rodadura [m].

Teniendo en cuenta la ecuación anterior 5.5 que definía la conicidad de la rueda se obtiene la ecuación 5.17:

$$\delta_o = \frac{r_B - r_A}{2 \cdot Y} \rightarrow 2 \cdot Y = y \rightarrow r_a - r_b = 2 \cdot y \cdot \delta_o \quad (5.17)$$

Por lo tanto, el desplazamiento lateral (y) que sufre el eje quedaría [14]:

$$y = \frac{r_o \cdot e}{R \cdot \delta_o} \quad (5.18)$$

Un segundo factor crítico en la estabilidad lateral en curva de un vehículo ferroviario es el peralte. El peralte en las curvas es utilizado en parte para tratar de minimizar, en la medida de lo posible, la aceleración centrífuga que sufre el vehículo por el hecho de circular sobre un tramo curvo.

Por otra parte, también ayuda a tratar de compensar las cargas que aparecen sobre los rieles de la vía, descargando el riel exterior y cargando el interior, disminuyendo de esta forma el desgaste tanto de la vía como de las ruedas, y aumentando con ello también el confort de marcha.

El peralte teórico se puede calcular realizando equilibrios de fuerzas a partir del esquema de la figura 3.14 de un vehículo ferroviario circulando por un peralte.

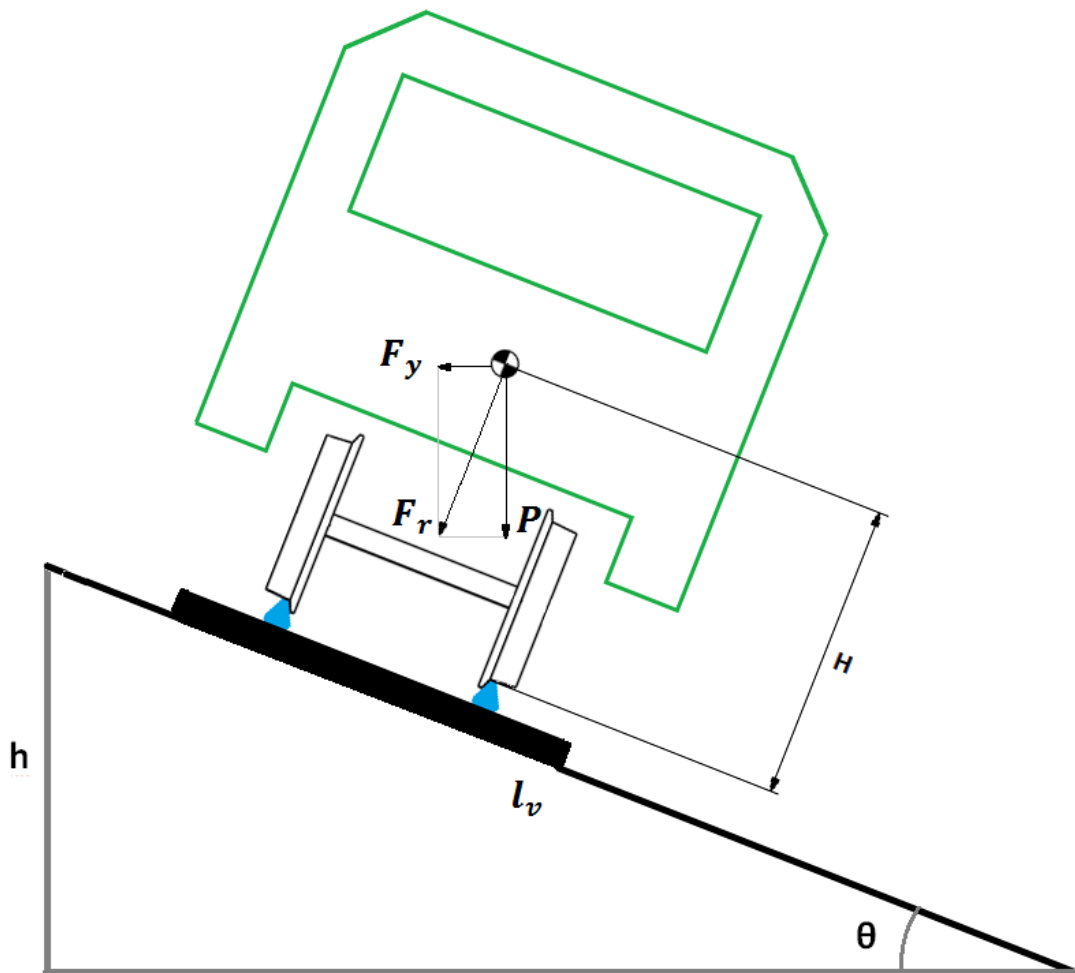


Figura 3.14. Esquema de fuerzas en un tramo peraltado.

Ecuaciones de la fuerza debida al peso del vehículo y a la fuerza centrífuga que actúa sobre él:

$$P = m \cdot g \quad (5.19)$$

$$F_y = m \cdot a_y \quad (5.20)$$

dónde:

- P = Peso del vehículo [kg].
- F_y = Fuerza centrífuga [N].
- m = Masa del vehículo [kg].
- g = Aceleración de la gravedad $\left[\frac{m}{s^2}\right]$.
- a_y = Aceleración normal $\left[\frac{m}{s^2}\right]$.

Igualando la masa de las dos ecuaciones anteriores 5.19 y 5.20:

$$F_y \cdot \cos(\theta) = P \cdot \sin(\theta) \quad (5.21)$$

dónde:

- P = Peso del vehículo [kg].
- F_y = Fuerza centrífuga [N].
- θ = Ángulo de peralte [rad].

Obteniendo la tangente de θ de la ecuación anterior 5.20 y sabiendo que la aceleración normal es igual al cuadrado de la velocidad lineal partido por el radio de curvatura:

$$\begin{aligned} \operatorname{tg}(\theta) &= \frac{m \cdot a_y}{m \cdot g} \rightarrow a_y = \frac{V^2}{R} \rightarrow \\ &\rightarrow \operatorname{tg}(\theta) = \frac{V^2}{g \cdot R} \end{aligned} \quad (5.22)$$

dónde:

- g = Aceleración de la gravedad $\left[\frac{m}{s^2}\right]$.
- θ = Ángulo de peralte [rad].

- R = Radio de curvatura [m].
- V = Velocidad de circulación por curva del vehículo [m/s].

Obteniendo la tangente de θ mediante trigonometría:

$$tg(\theta) = \frac{h}{\sqrt{l_v^2 - h^2}} \quad (5.23)$$

dónde:

- $l_v = 2 \cdot e$ = Separación entre los planos de rodadura [m].
- h = Altura del peralte teórico [m].
- θ = Ángulo de peralte [rad].

Igualando las ecuaciones anteriores 5.22 y 5.23:

$$\frac{V^2}{g \cdot R} = \frac{h}{\sqrt{l_v^2 - h^2}} \rightarrow h = \frac{l_v \cdot V^2}{\sqrt{g^2 \cdot R^2 + V^4}} \quad (5.24)$$

dónde:

- $l_v = 2 \cdot e$ = Separación entre los planos de rodadura [m].
- h = Altura del peralte teórico [m].
- R = Radio de curvatura [m].
- V = Velocidad de circulación por curva del vehículo [m/s].
- g = Aceleración de la gravedad $\left[\frac{m}{s^2}\right]$.

Por otra parte, asumiendo que el ángulo de peralte es muy pequeño, se tiene que [14]:

$$tg(\theta) = sen(\theta) = \theta = \frac{h}{l_v} \rightarrow \text{De la ecuación 5.22} \rightarrow h = \frac{V^2 \cdot l_v}{g \cdot R} \quad (5.25)$$

El parámetro l_v corresponde con la separación entre los planos de rodadura, no se ha de confundir con la distancia entre carriles.

Como se puede observar mediante la ecuación obtenida anteriormente 5.25, la altura de peralte depende de la velocidad de circulación del vehículo, por lo tanto, cada peralte está diseñado para un único valor específico de velocidad de circulación.

Esto presenta el problema de que dicha velocidad está establecida para un peralte determinado, y no siempre va a poder cumplirse dicha velocidad en función del tipo de vehículo ferroviario que se esté utilizando.

Es por ello, que para elegir el peralte adecuado de una curva, se ha de tener en cuenta tanto los tipos de vehículos que circularán por ella, como la media ponderada de las velocidades que son capaces de alcanzar cada uno de ellos. Optando de esta forma por peraltes optimizados para altas velocidades (sufren más desgaste en el riel interior), en el caso de vehículos ligeros capaces de alcanzar altas velocidades, o peraltes optimizados para velocidades bajas, los cuales van destinados a vehículos más pesados y lentos (los cuales son propicios a presentar problemas en las sujeciones de los raíles).

Además, se ha de tener siempre en cuenta que el peralte ha de ser lo suficientemente bajo como para que la vía sea capaz de soportar cualquier vehículo que se encuentre totalmente detenido sobre ella. El valor máximo del peralte para que se cumpla esta última condición no suele rebasar los 200 mm [1].

Por todo lo anterior, es muy habitual encontrarse situaciones en las que el peralte disponible resulta insuficiente para la velocidad que lleva un vehículo en concreto, y aparece por lo tanto, lo que se denomina aceleración no compensada. Un vehículo ferroviario al circular por una curva sufre una aceleración centrífuga la cual, parte de ella es compensada por el peralte de la propia curva, y parte de ella no puede ser compensada y se le denomina aceleración no compensada.

Por lo tanto, el déficit de peralte que puede ser tolerado por un vehículo es función de la cantidad de aceleración no compensada que se desee tener. Esta aceleración no compensada va a depender fundamentalmente de la aceleración centrífuga que los pasajeros del vehículo ferroviario estén dispuestos a soportar (en el caso de vehículos de mercancías, esta aceleración centrífuga no compensada puede llegar a ser superior que en la de vehículos de pasajeros).

La aceleración centrífuga tolerable por un pasajero suele ser del orden de 0,09 g, aproximadamente 0.9 m/s^2 . Con el doble de dicha aceleración el pasajero comienza a tener sensación de incomodidad.

La ecuación 5.26 relaciona la aceleración centrífuga que afecta al pasajero con la aceleración no compensada [1].

$$a_{viajero} = a_{cnc} \cdot (1 + c) \quad (5.26)$$

dónde:

- $a_{viajero}$ = Aceleración centrífuga sobre los viajeros $[m/s^2]$.
- a_{cnc} = Aceleración centrífuga sin compensar $[m/s^2]$.
- c = Efecto souplesse.

El parámetro “c” corresponde con el efecto souplesse y su valor depende de la suspensión del vehículo ferroviario, normalmente toma un valor de en torno a 0,4. Por lo tanto, sustituyendo valores en la ecuación 5.26 se puede obtener un valor limitante para la aceleración no compensada de $0,65 m/s^2$.

Con todo lo anterior, a partir de la ecuación 5.25, y teniendo como base que la altura de peralte real (h') disponible resulta insuficiente, y un valor máximo de aceleración no compensada de $0,65 m/s^2$, se puede establecer la velocidad de paso por curva de un vehículo ferroviario máxima con la altura de peralte disponible.

$$h = \frac{l_v \cdot V^2}{R \cdot g} \rightarrow \frac{h \cdot g}{l_v} = \frac{V^2}{R} = a_c \quad (5.27)$$

El termino anterior “ a_c ” corresponde con la aceleración centrífuga sufrida por el vehículo. El peralte real de la curva (h') permite obtener una aceleración centrífuga compensada (a_{cc}) igual a:

$$a_{cc} = \frac{h' \cdot g}{l_v} \quad (5.28)$$

Si el peralte real (h') es inferior al peralte teórico (h), está claro que toda la aceleración centrífuga no va a ser compensada y por lo tanto, aparecerá una aceleración centrífuga sin compensar (a_{cnc}) cuyo valor límite es de $0,65 m/s^2$:

$$a_{cnc} = 0,65 m/s^2 = a_c - a_{cc} = \frac{V^2}{R} - \frac{h' \cdot g}{l_v} \quad (5.29)$$

Finalmente, despejando de la ecuación 5.29 resultante, se obtiene la ecuación 5.30 que proporciona la velocidad de paso por curva deseada [1]:

$$V = \sqrt{R \cdot (a_{cnc} + \frac{h' \cdot g}{l_v})} \quad (5.30)$$

dónde:

- l_v = Separación entre los planos de rodadura [m]
- h' = Altura del peralte real [m]
- R = Radio de curvatura [m].
- V = Velocidad de circulación por curva del vehículo [m/s].
- g = Aceleración de la gravedad $\left[\frac{\text{m}}{\text{s}^2}\right]$.
- a_{cnc} = Aceleración centrífuga sin compensar $\left[\frac{\text{m}}{\text{s}^2}\right]$.

Capítulo 4. Modelado de un vehículo ferroviario en Simpack

En este capítulo se realiza la modelización completa paso por paso del vehículo ferroviario en Simpack, mencionándose todos los aspectos de diseño importantes a tener en cuenta para dicha modelización.

Además, se profundiza en el software utilizado para la modelización, Simpack, teniendo en cuenta aspectos como su historia y desarrollo, así como sus pautas de funcionamiento más importantes y los conceptos necesarios para poder trabajar con el software correctamente.

4.1 Introducción a los modelos informáticos

Gracias a los avances tecnológicos conseguidos en los últimos años, y sobretodo en el campo de la informática, es posible construir un modelo informático de un vehículo ferroviario y hacerlo circular por una vía estándar, en un entorno virtual, consiguiendo con ello simular y estudiar diseños o cambios de parámetros sin tener que realizar costosos ensayos en la vida real.

Los resultados del modelo informático y de su simulación pueden proporcionar predicciones y datos muy precisos del comportamiento real que tiene el vehículo ferrocarril y de su interacción con la vía.

Ejemplos comunes de elementos que se pueden optimizar mediante la simulación del modelo informático del vehículo ferroviario es la optimización de las suspensiones, o el contacto entre rueda y rail entre muchos otros.

Las entradas más habituales que se implementan al modelo informático suelen ser irregularidades de la vía, tanto verticales como laterales, desviaciones en el ancho de vía y nivelación, además también es posible implementar elementos singulares como juntas de carril o desvíos, entre muchos otros más.

4.2 Simpack

Simpack es un software informático de simulación multi-cuerpo capaz de realizar análisis dinámicos, mecánicos, o electromecánicos. Lo cual permite calcular modelos virtuales en 3D y realizar predicciones de movimientos o cálculos de fuerzas y tensiones entre otras muchas cosas.

La andadura comercial de Simpack comenzó en 1993 con la creación de INTEC para poder comercializar el código de Simpack, el cual, comenzó a desarrollarse en el Centro Alemán de Investigación Aeroespacial (DLR). Por esas fechas, la versión 5 de Simpack ya era un potente producto con avanzados gráficos en 3D y un muy desarrollado modelo interactivo de configuración a través de la interfaz gráfica del usuario. Además, en 1993 también se contó con el apoyo de Siemens Transportation Systems para comenzar el desarrollo del análisis del contacto rueda carril.

Dos años más tarde salió al mercado la versión 6 de Simpack, esta versión era capaz de realizar análisis y cálculos en el contacto rueda carril, y por ello su

acogida en el mundo ferroviario fue muy grande, convirtiéndose en el líder del mercado a finales de los años 90.

Con la versión 7 de Simpack de 1997 se incluyeron una serie de mejoras relacionadas con el sector automotriz, lo cual tuvo un éxito inmediato al proporcionar una precisión y rendimiento en el cálculo de las simulaciones superior al de la competencia.

En 1999 salió al mercado la versión 8 de Simpack que, junto con la versión 8.5, introdujeron varias mejoras en la interfaz de usuario, así como un módulo de optimización y compatibilidades con código de MATLAB.

A partir de la versión 8.6, la cual contenía más de 300 novedades respecto a la versión 8.5, se fueron mejorando aspectos y añadiendo módulos hasta llegar a las versiones más actuales de Simpack, como la 9.5.1, que es la utilizada para la simulación del vehículo ferroviario que se detalla en este documento en el apartado 4.3.

El campo de aplicación de Simpack es principalmente la ingeniería mecánica. Sectores como el automotriz, aeroespacial, ferroviario, energías renovables y muchos otros, son aptos para el uso de este software.

Las principales ventajas que presenta Simpack respecto a otros programas presentes en el mercado es su buen funcionamiento realizando análisis a altas frecuencias y su facilidad para trabajar con elementos flexibles y disipadores de energía.

En cuanto al análisis y diseño de vehículos ferroviarios, el uso de Simpack ofrece varias ventajas como, por ejemplo, posee un potente editor de vías ferroviarias, tiene un fácil montaje de los vehículos ferroviarios, realiza análisis de cada rueda individualmente, realiza análisis de las fuerzas sobre las vías, y posee gran flexibilidad para modificar cualquier parámetro, entre otras muchas más cualidades.

4.3 Modelado del vehículo ferroviario

Como se ha comentado anteriormente, el moldeado y la simulación del vehículo ferroviario se realizan mediante Simpack 9.5.1. Trabajar con este software, si bien requiere su tiempo de adaptación, acaba siendo muy intuitivo y conforme el usuario se va familiarizando con las distintas funciones y parámetros con los que se trabaja, el manejo del software acaba siendo bastante cómodo y preciso.

Además, el software hace disponible en todo momento un menú de ayuda muy útil. Presionando el botón F1 una vez dentro del programa, se pueden encontrar tutoriales, guías y diversa documentación que puede resultar de gran ayuda y que se utiliza, como se muestra más adelante, para el modelado y la simulación del vehículo [4].

El tipo de vehículo ferroviario que se desea modelizar en Simpack, y posteriormente simular, se trata de un coche, evidentemente destinado al transporte de personas, el cual, consta de dos bogies con dos ejes montados cada uno de ellos, y suspensión secundaria lateral activa dirigida mediante un controlador de lógica difusa. También se modeliza una versión del mismo vehículo ferroviario provisto de suspensión lateral pasiva, para de esta forma poder tomar datos de referencia sobre la dinámica del vehículo, y compararlos con los resultados obtenidos con el vehículo provisto de suspensión activa.

A continuación, se detalla punto por punto el proceso que se ha seguido para el modelado del vehículo ferroviario.

4.3.1 Pasos previos

Para el modelado del vehículo ferroviario, se comienza con la creación de un modelo de bogie que, posteriormente, se acopla al diseño del coche como una “subestructura” formando, de esta forma, el vehículo ferroviario completo.

Por lo tanto, el primer paso en el proceso de modelado del vehículo ferroviario mediante Simpack, es la creación de una carpeta denominada “subestructuras” donde se ubican las subestructuras que se vayan modelizando posteriormente.

Además de esta carpeta, se crean también otras dos carpetas denominadas “variables” y “funciones” (figura 4.1) destinadas a la ubicación de las variables y de las funciones, que se utilizan para regir el comportamiento de resortes, amortiguadores, barras de torsión, etc. (archivos del tipo .if2), y que han de estar establecidas previamente, ya que la manera con la que se trabaja con el software consiste simplemente en importa dichas funciones y trabajar con ellas, pero en ningún momento crea ninguna de ellas, aunque se podría hacer.

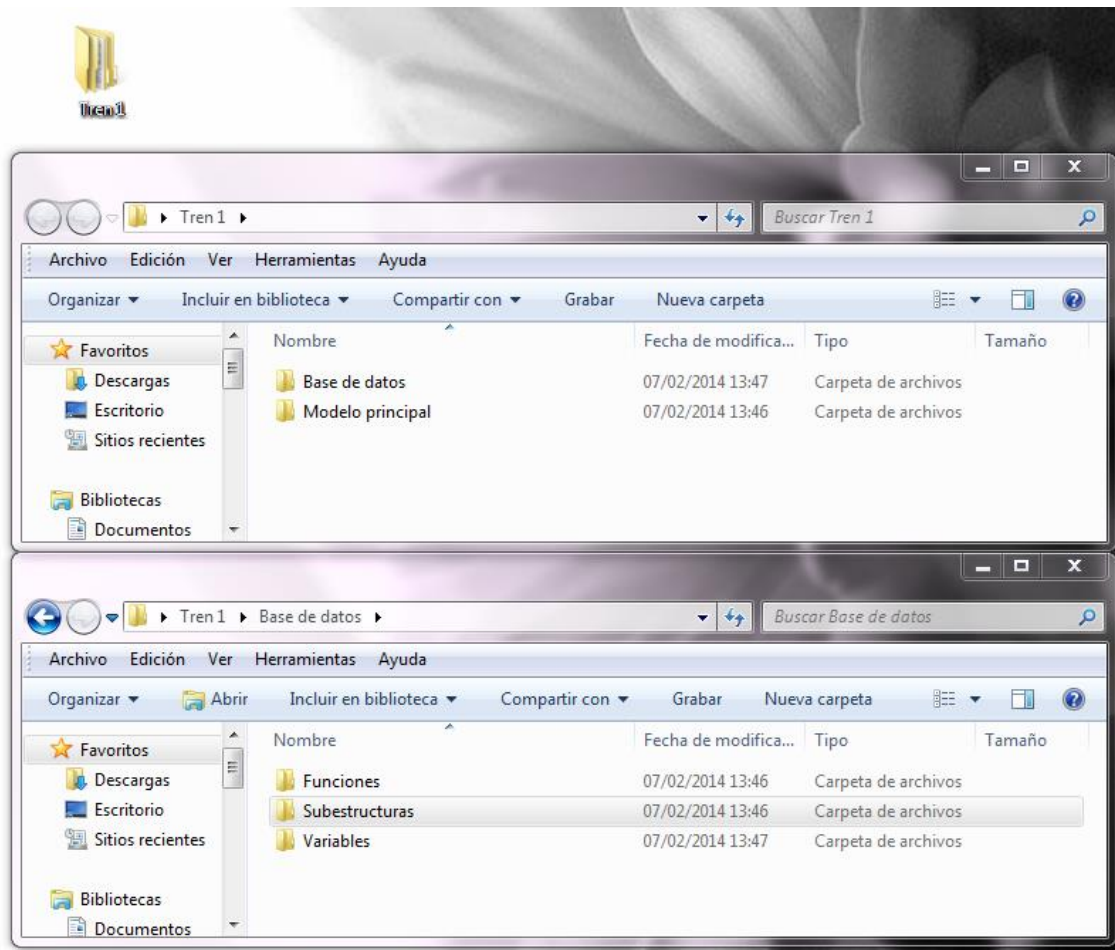


Figura 4.1. Carpetas que se han de crear.

4.3.2 Modelado del eje montado

Para el modelado de los ejes montados se utiliza la información que se encuentra en el apartado F.4.1.1 del menú de ayuda de Simpack [4].

A continuación, se detalla el proceso de modelado del eje montado:

- **Creación de un nuevo modelo:** Se comienza creando un nuevo modelo en Simpack, para ello, se accede a File\New...\Create new model\General creándose de esta forma el nuevo modelo al que se le nombra como “WS” y que ha de guardarse en la carpeta “subestructuras” creada anteriormente. Posteriormente, en la pestaña “Globals” se invierte el sentido de la gravedad en la dirección z de menos a más, (es recomendable girar la vista 180 entorno al eje X ó Y para tener una mejor visualización del progreso del moldeado en los pasos posteriores).
- **Creación del “Body”:** Una vez hechos estos dos pasos anteriores, en la pestaña “Bodies” se renombra el archivo existente con el siguiente nombre “\$B_Wheelset” y, a continuación, se introducen los valores de la inercia y de la masa que aparecen en la tabla 4.1 como se muestra en la figura 4.2.

Tabla 4.1. Valores de inercia y masa para el eje montado.

Masa:	1000 kg
Inercia en el eje X:	1000 kg · m ²
Inercia en el eje Y:	100 kg · m ²
Inercia en el eje Z:	1000 kg · m ²

Body Properties: \$B_Wheelset

Name: \$B_Wheelset

Type: Rigid

Mass Properties

Data input: Manual

Mass: 1000

Center of Gravity

Position: x 0 y 0 z 0

Relative to: Body Reference Frame

Inertia

Moments of inertia:

	x	y	z
x	1000	0	0
y	sym	100	0
z	sym	sym	1000

Relative to: Body Reference Frame

Comment

OK Cancel Apply

Figura 4.2. Valores de masa e inercia para el eje montado.

En la pestaña “Geometry”, se renombra el archivo existente por “\$P_Wheelset_Shaft”, y se cambia el tipo de archivo a “2: Cylinder” asignándole un altura de 2200 mm, un diámetro exterior de 180 mm, y un número de planos igual a 25 (figura 4.3).

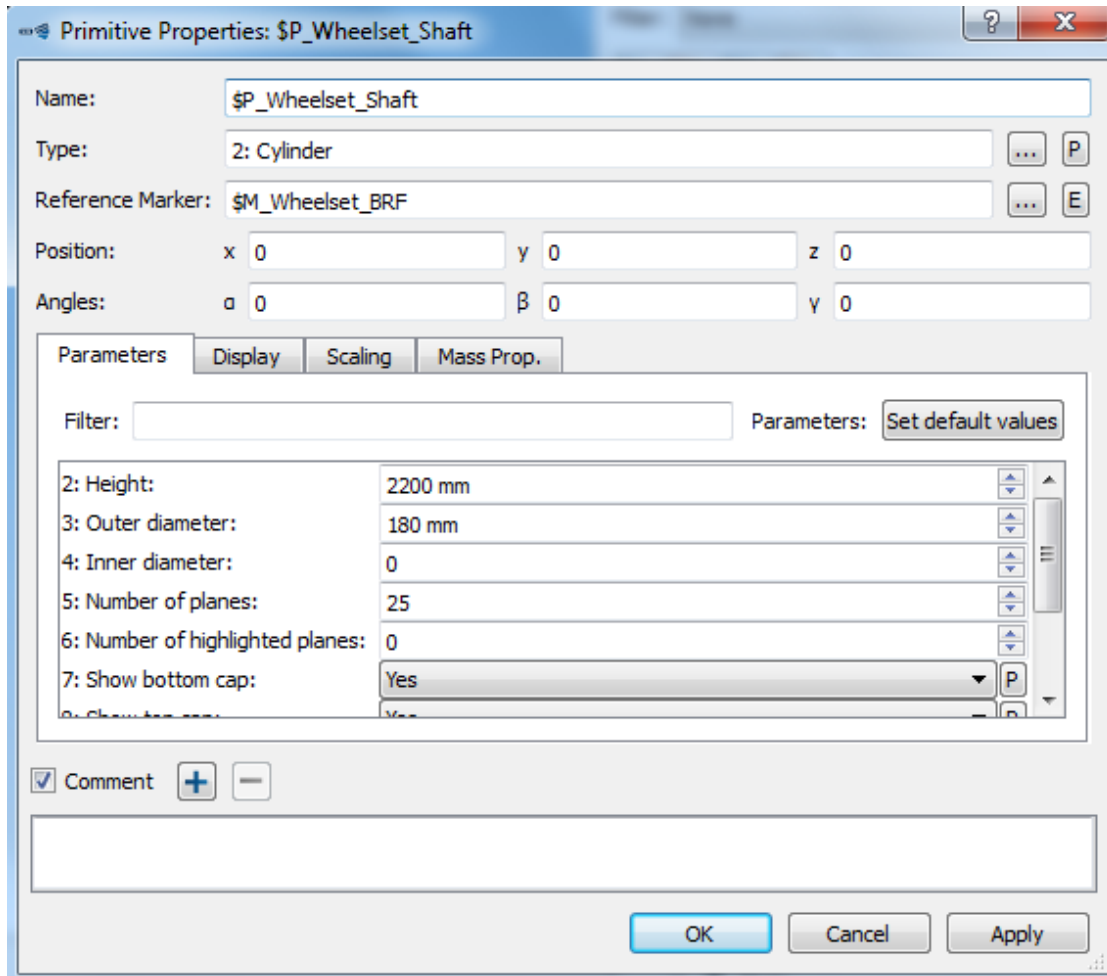


Figura 4.3. Geometría del eje montado.

- **Creación del “Track”:** a continuación, se efectúa un primer moldeado de la vía. Para ello, se empieza creando un nuevo “Track” al que se le denomina “\$Trk_Track”, en la opción “Type” se selecciona la denominación “rail”, adquiriendo de esta forma el sistema de coordenadas adecuado para la vía. Posteriormente, se especifica un valor para la “Reference baselength” de 1.5 m y se cierra la ventana asociada a las propiedades de la vía.
- **Creación de la “SubVar”:** una vez efectuados estos pasos, se vuelve al eje montado y se procede a especificar el radio nominal del mismo, para ello, se crea una nueva “SubVar” denominada “\$ _Wheelset_Rnom”, a la cual, se le atribuye un valor de 460 mm (las “SubVars” son variables que se pueden crear en cualquier momento y a las que se le puede atribuir un valor determinado, ya sea constante o, incluso, variable).
- **Propiedades del “Joint”:** en el apartado “Joint” se establecen las condiciones de contorno y la posición del elemento (figura 4.4). Una vez creada la “SubVar” del punto anterior, se pincha en la pestaña “Joints” para cambiar el “Type” del único archivo existente a “7: General Rail Track Joint” y especificar en la posición inicial del eje Z, la “SubVar”

anterior “\$ _Wheelset_Rnom”, con un signo menos delante, debido al cambio de sentido de la gravedad realizado al principio de este apartado 4.3.2, cuando se indicaron las pautas para la creación un nuevo modelo.

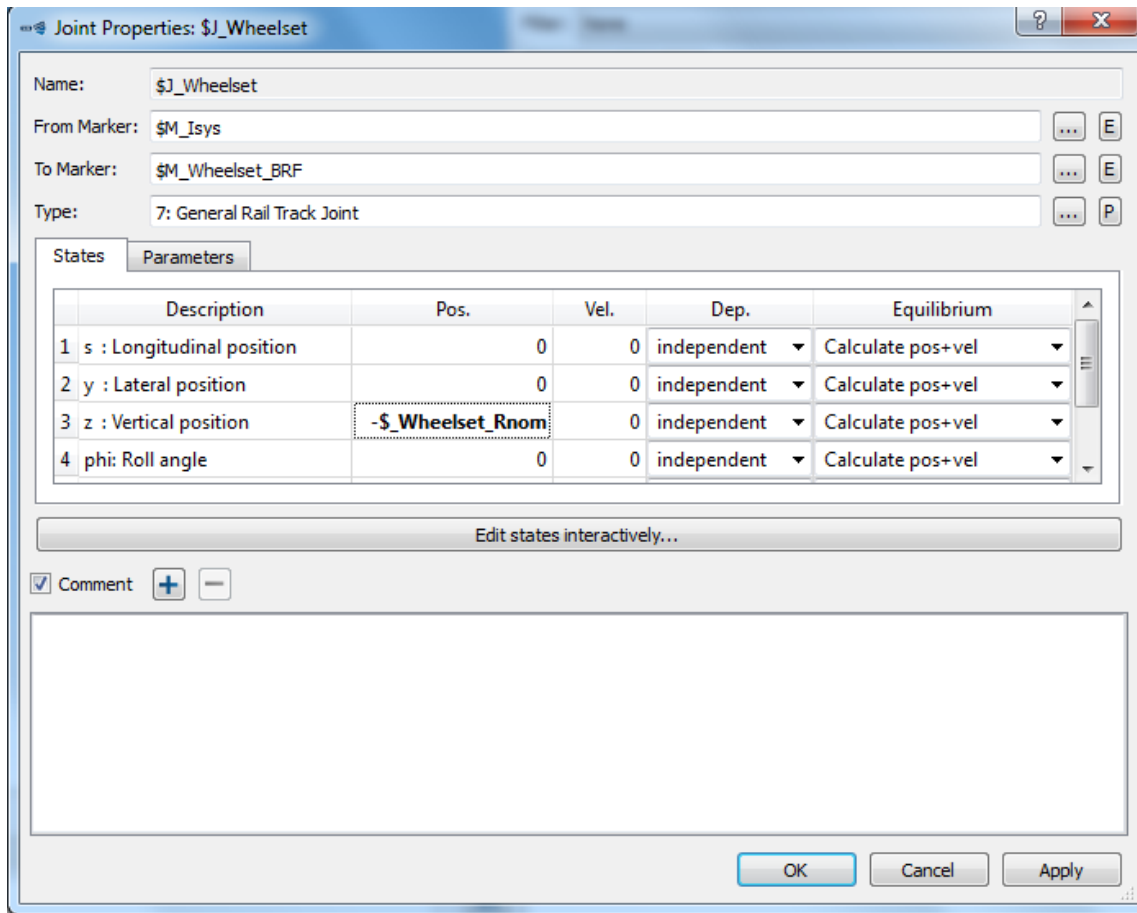


Figura 4.4. Condiciones de contorno y posición del eje montado.

- **Creación del “Rail”:** seguidamente, se crea un nuevo “Rail” al que se le nombra como “\$RWR_Rails”, en el que se especifica un canto con una relación de 1:40. También se ha de comprobar que el perfil del rail corresponde con el UIC60, y se selecciona como “Lateral rail distance method”, la opción de “from gauge at first rail profile”.
- **Modelado de la rueda derecha:** una vez definidos los parámetros de la vía y del eje, para terminar el eje montado, queda modelizar el par de ruedas correspondiente a dicho eje, y su contacto con el rail.

Para ello, se comienza creando la rueda derecha seleccionándola opción de nuevo “Rail-Wheel Pair” y asociándole el nombre de \$RWP_Wheelset_Right”. A continuación, se selecciona como “Wheel Carrier Body” el “Body” creado anteriormente llamado “\$B_Wheelset”. Una vez efectuado esto, en la pestaña de “Wheel”, se efectúan las siguientes acciones que se indican, también, en la figura 4.5:

- Se selecciona como “Wheel Body”, de nuevo, el “Body” creado anteriormente “\$B_Wheelset”.
- Se selecciona como “Wheel Marker”, el sistema de referencia situado en el centro del eje montado, “\$M_Wheelset_BRF”.
- Como “Wheel Rotatory Joint” se selecciona el “Joint” creado anteriormente “\$J_Wheelset”.
- Se selecciona la opción “Pitch angle” como “Joint state”.
- Se comprueba que el perfil de la rueda sea el S1002.
- En la opción “Nominal wheel radius” debería aparecer el valor 0,46 m, de lo contrario se ha de introducir como valor el nombre de la “SubVar” creada anteriormente “\$_Wheelset_Rnom”.
- Por último, se establece como valor de “Lateral wheel distance”, el cual es la distancia lateral entre el centro del eje montado y el perfil de referencia de la rueda, una magnitud de 750 mm.

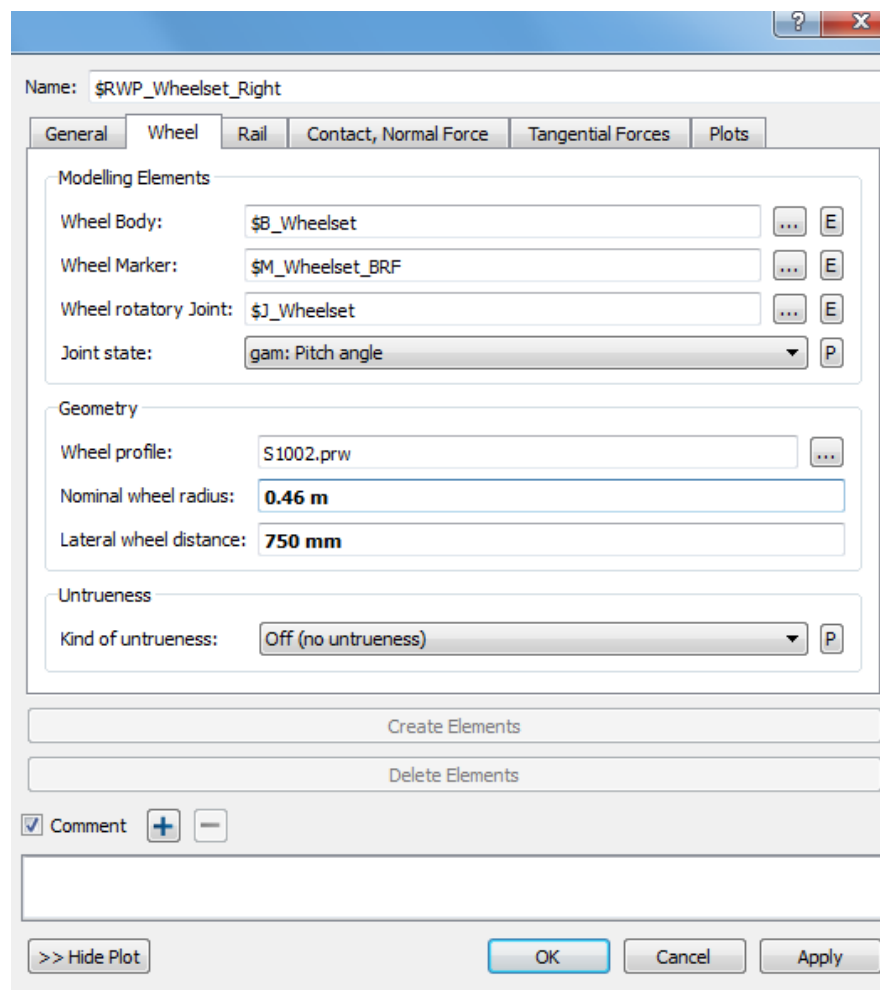


Figura 4.5. Características de la rueda derecha del eje montado.

Una vez alcanzado este punto, el software dispone de toda la información necesaria para el moldeado de la rueda.

Así pues, sólo falta establecer los parámetros del contacto rueda rail. Para ello, haciendo “click” en la pestaña “Rail”, sin salir de la ventana anterior de las propiedades del “Rail-Wheel Pair”, se selecciona como “Rail” el archivo “\$RWR_Rails” creado anteriormente. Posteriormente, en la pestaña “Tangential Forces” de la misma ventana anterior, se crea un nuevo archivo (con todos los parámetros por defecto) en la opción “tangential (creep) forces”, con el nombre de “\$RWC_FASTSIM” como se muestra en la figura 4.6.

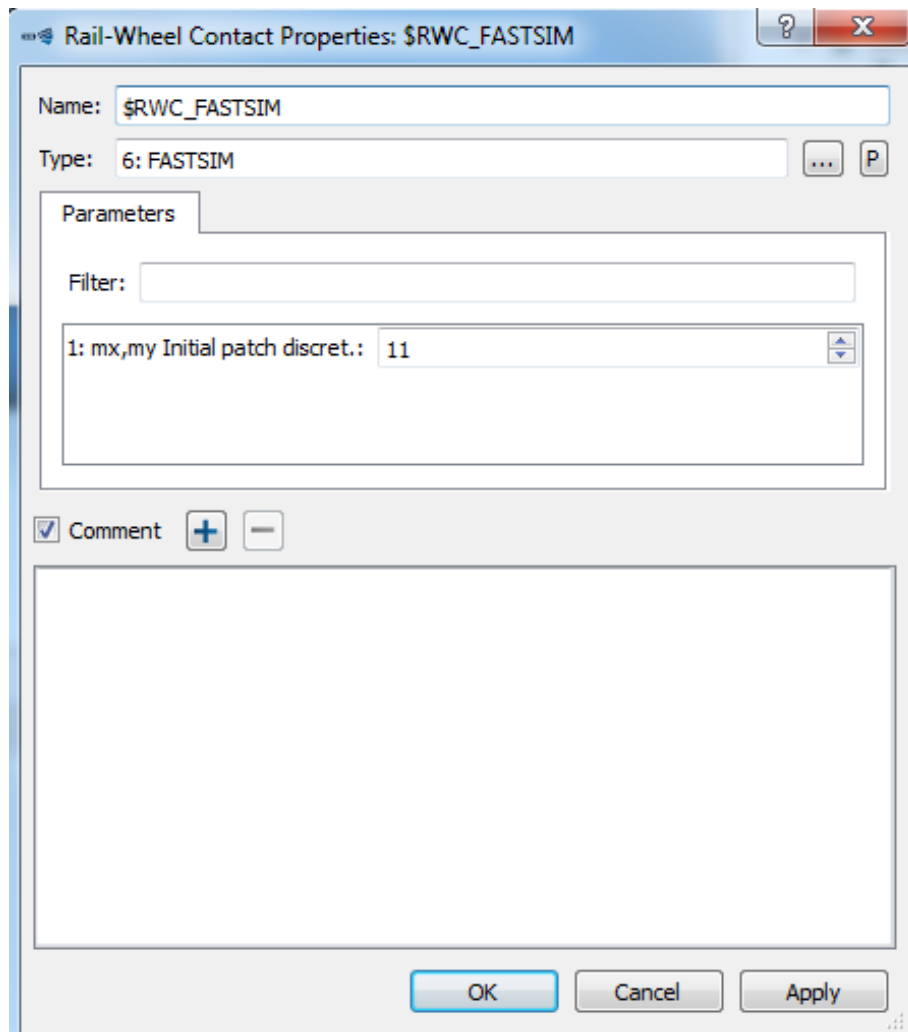


Figura 4.6. Creación del archivo \$RWC_FASTSIM.

Finalmente, seleccionando un coeficiente de fricción de valor 0.4, y haciendo “click” en la opción “Apply” de la opción “Create Elements”, debe de mostrarse en la pantalla la rueda derecha montada sobre el eje como se observa en la figura 4.7.

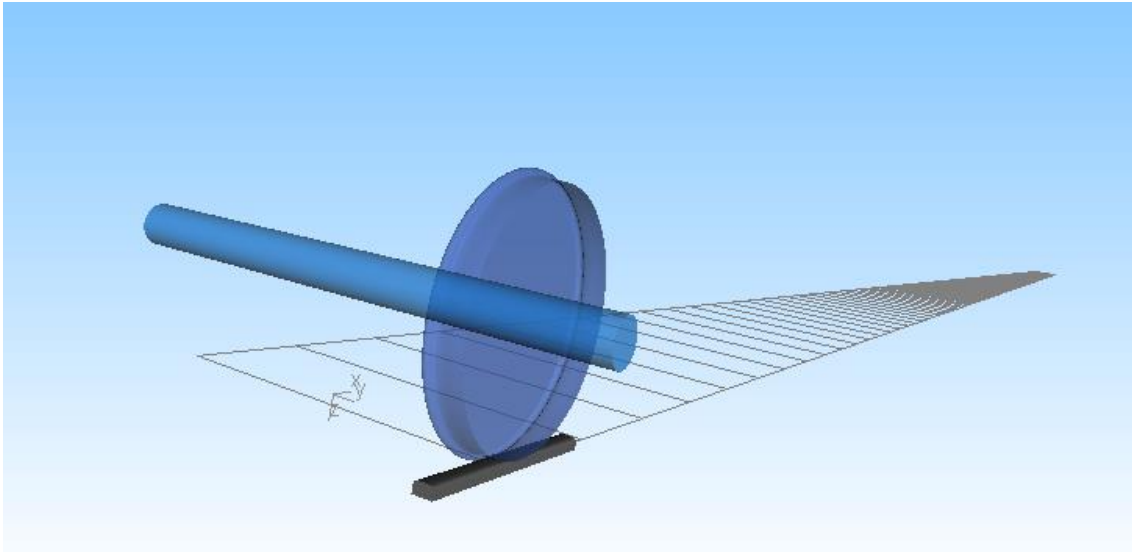


Figura 4.7. Conjunto eje más rueda derecha.

- **Modelado de la rueda izquierda:** para el modelado de la rueda izquierda del eje montado, se ha de copiar el archivo creado anteriormente “\$RWP_Wheelset_Right” y se ha de volver a pegar dentro de la rama “Rail-Wheel Pair”, renombrándolo como “\$RWP_Wheelset_Left”.

Una vez hecho esto, se entra en la ventana de propiedades de la rueda izquierda, y se selecciona la opción “Side w.r.t. Track forward direction” como “Left”, seguidamente haciendo clic en “Apply” y posteriormente en “Create Elements”, aparece la rueda izquierda sobre el eje, y el moldeado del eje montado estará prácticamente finalizado.

- **Creación del “Wheelset”:** el último paso para finalizar el eje montado, es el de crear un “Wheelset” al que se le asigna el nombre de “\$RWT_Wheelset”. Una vez hecho esto, en la ventana de propiedades del “Wheelset”, se selecciona como “Right-hand Rail-Wheel Pair” el archivo creado anteriormente “\$RWP_Wheelset_Right”, y como “Left-hand Rail-Wheel Pair”, el archivo “\$RWP_Wheelset_Left”.

Seguidamente, haciendo “click” en “Apply” y, posteriormente, en “Create Elements”, Simpack muestra en pantalla gráficas y detalles sobre el contacto rueda-rail que se ha definido.

- **Creación de los “Markers” sobre las ruedas:** para conectar las ruedas con la suspensión primaria del tren se deben añadir cuatro marcadores por cada eje. Esto es así debido a que cada rueda ha de disponer de dos marcadores, uno para el muelle y otro para el amortiguador. Para ello, haciendo click en la pestaña “\$B_Wheelset”, dentro de la rama “Bodies”, se puede hacer “click” derecho en el apartado “Markers”, y crear tantos marcadores como se desee (figura 4.8).

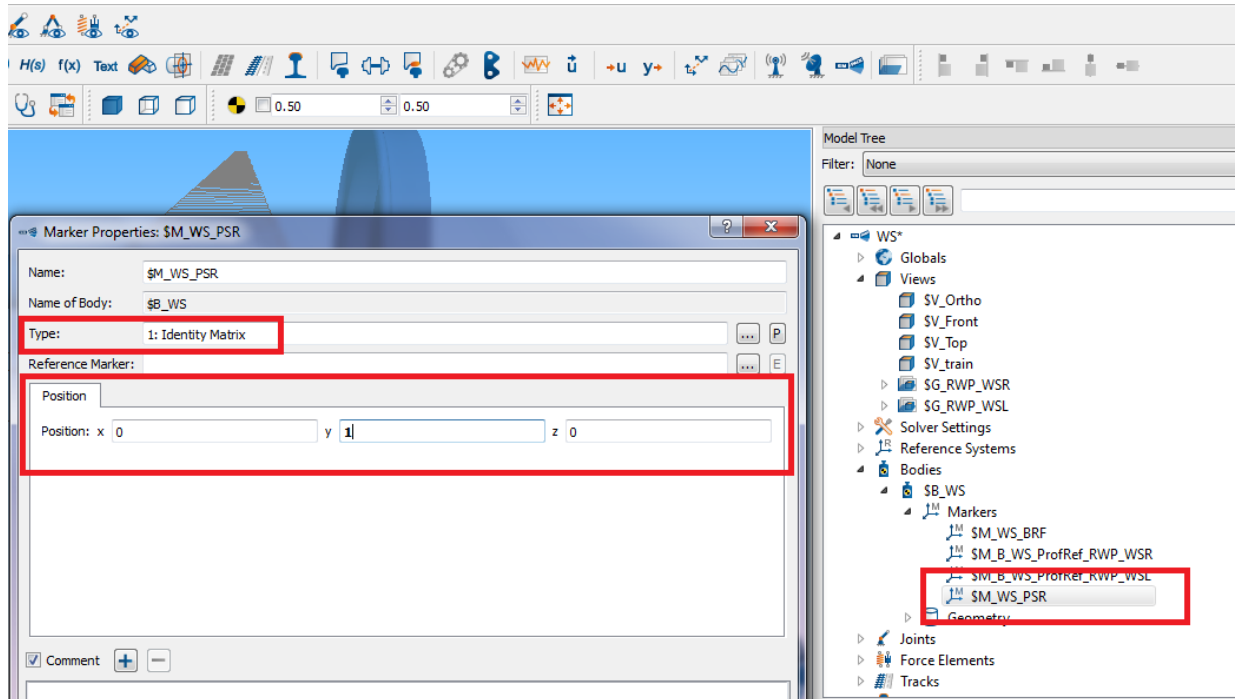


Figura 4.8. Características de los marcadores sobre las ruedas.

Los marcadores necesarios para la suspensión primaria aparecen en la tabla 4.2, y todos ellos son del tipo “1: Identity Matrix”. Cabe mencionar que las coordenadas expuestas en la tabla 4.2 están referidas a una longitud del eje de 2.2 m, tal y como viene indicado en el apartado F4.1.1 del menú de ayuda de Simpack [4].

Tabla 4.2. Marcadores suspensión primaria.

Nombre del marcador	Posición
\$M_WS_PSR	(0,1,0)
\$M_WS_PSL	(0,-1,0)
\$M_WS_PDR	(0,1,0)
\$M_WS_PDL	(0,-1,0)

4.3.2 Modelado del bogie

Los pasos para realizar la correcta modelización del bogie en Simpack, a partir del modelado del eje montado, son:

- **Creación del modelo:** el modelo correspondiente al bogie se guarda en la carpeta subestructuras, con el nombre Bogie. En primer lugar, al igual que con las ruedas, se cambia la gravedad para el sentido positivo, y para evitar errores del programa, se crea una pista ferroviaria y raíles (Archivos “Track” y “Rail” correspondientemente), al igual que se hizo con el modelado del eje montado. Además, se ha de borrar el “Body” que viene hecho por defecto.

Una vez hecho todo lo anterior, yendo a la pestaña “Globals”, se pulsa en “Search path” y se elige la carpeta “subestructuras” como base de datos, para poder importar el eje montado creado previamente, y que se necesitará posteriormente para el modelado del bogie (figura 4.9).

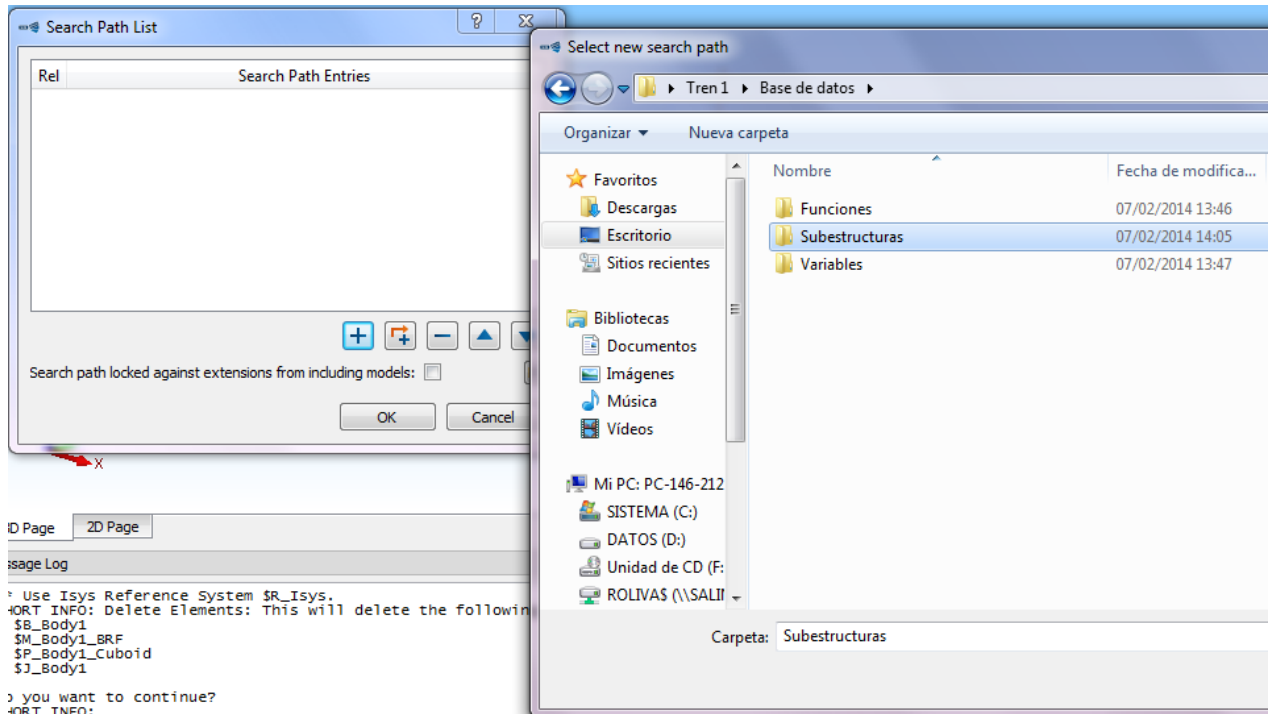


Figura 4.9. Añadir subestructuras al "Search Path".

- **Importación de las ruedas como subestructuras:** una vez se elige esa carpeta, se importan las ruedas como subestructuras. Para ello, pulsamos en el botón subestructuras que se muestra en la figura 4.10:

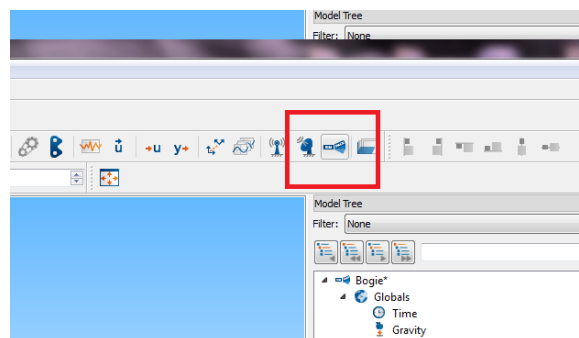


Figura 4.10. Botón para crear una nueva subestructura.

A continuación, se selecciona el modelo “WS” creado en el punto 2 en el apartado “Filename” de la ventana de propiedades de la subestructura, y se le asocia el nombre de “\$S_WSR” a la subestructura creada.

Una vez se han importado las ruedas traseras, se sigue el mismo procedimiento para importar las ruedas delanteras, asociando en este caso, el nombre “\$S_WSF” a la subestructura.

Ya se tienen los dos ejes montados del bogie que se desea modelar importados como subestructuras. Ahora, se procede a configurar los “joints” de la subestructura “WSF”, puesto que la posición por defecto de la subestructura “WSR” ya es la correcta. Para ello, se acude a la pestaña “Joints” y de modifica las propiedades la subestructuras como se muestra en la figura 4.11.

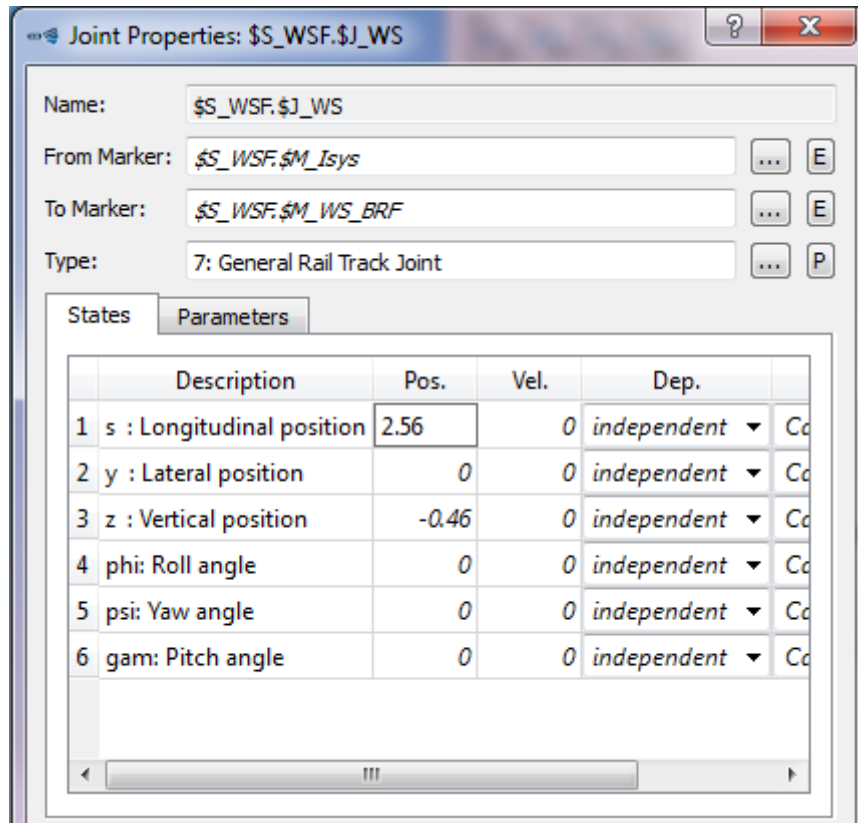


Figura 4.11. Condiciones de contorno y posición del elemento \$J_WS.

Como se observa en la figura 4.11, se debe cambiar la posición longitudinal del eje montado delantero a un valor de 2.56 m, quedando el modelo como se muestra en la figura 4.12.

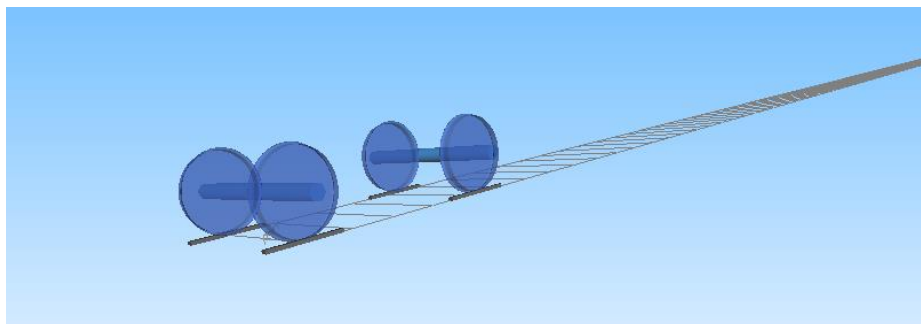


Figura 4.12. Posición de los ejes montados del bogie delantero.

- **Generación del bastidor del bogie:** para la generación del bastidor del bogie, se comienza por la creación de un nuevo “Body”, al que se le nombra como “\$B_FRAME” y, a continuación, se especifican sus características

relativas a su masa e inercia indicadas en la tabla 4.3, tal y como se muestra en la figura 4.13.

Tabla 4.3. Valores de inercia y masa del bogie.

Masa:	2615 kg
Inercia en el eje X:	1722 kg · m ²
Inercia en el eje Y:	1476 kg · m ²
Inercia en el eje Z:	3076 kg · m ²
Coordenadas centro de gravedad:	(0,0,-0.6) m

Body Properties: \$B_FRAME

Name: \$B_FRAME

Type: Rigid

Mass Properties

Data input: Manual

Mass: 2615

Center of Gravity

Position: x 0 y 0 z -0.6

Relative to: Body Reference Frame

Inertia

Moments of inertia:

	x	y	z
x	1722	0	0
y	sym	1476	0
z	sym	sym	3076

Relative to: Center of Gravity

Comment

OK Cancel Apply

Figura 4.13. Valores de masa e inercia para el bogie.

Una vez especificadas las características del bastidor, se introducen sus datos relativos a su geometría. Para ello, dentro de la rama "Bodies", en la pestaña de "Geometry" se efectúa doble "click" sobre el archivo "\$P_FRAME", accediendo a la ventana que se muestra en la figura 4.14, en dicha ventana, se especificaran los todos y cada uno de los datos que aparecen en dicha figura relativos a cotas, posicionamiento y tipode geometría, en este caso "22: Wheel Rail bogie", correspondientes con el bastidor del bogie.

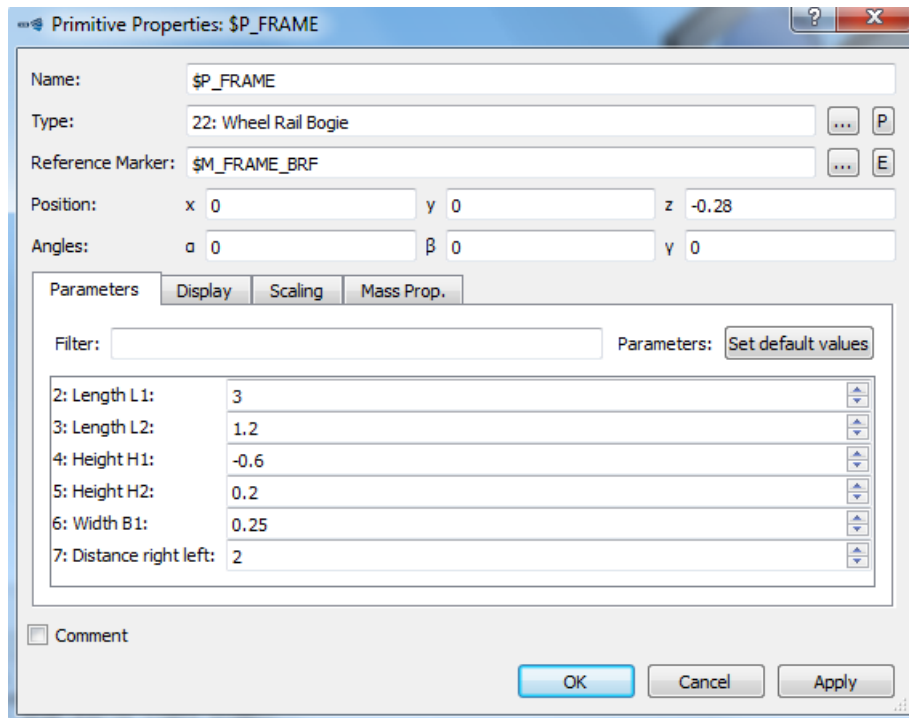


Figura 4.14. Valores de la geometría del bogie I.

Hecho esto anterior, para finalizar la geometría del bastidor del bogie, se crea una nueva geometría con el nombre “\$P_FRAME_CUBE” y de tipo “1: Cuboid” haciendo doble “click” en “Geometry”, e introduciendo los valores de la figura 4.15.

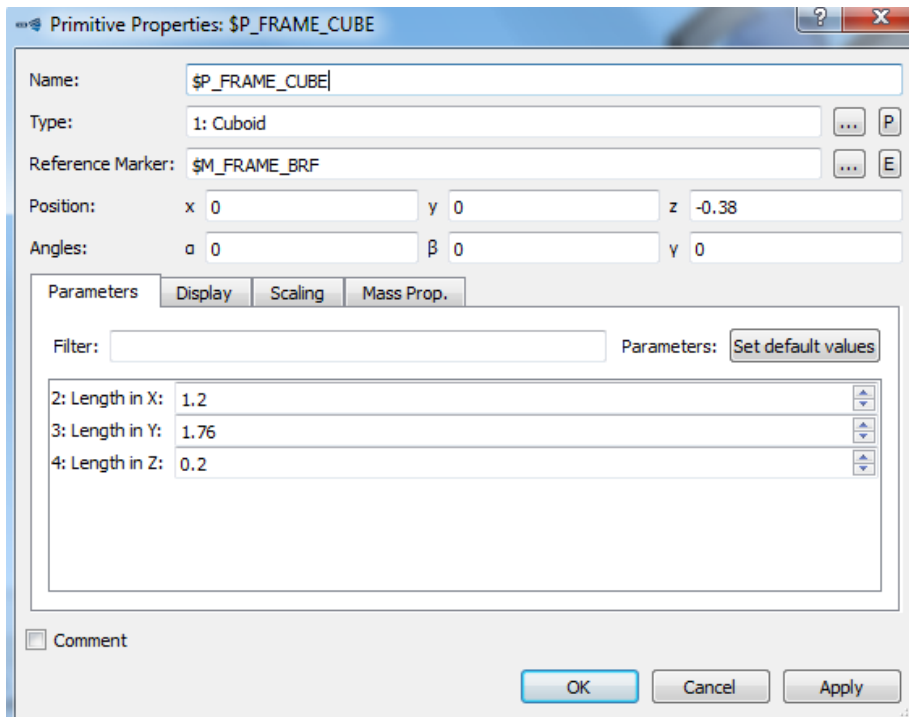


Figura 4.15. Valores de la geometría del bogie II.

Finalmente, el siguiente paso, es el modificar el “joint” del bogie. Para ello, se pulsa en “joint”, y se accede al archivo “\$J_FRAME”, especificando en la ventana de propiedades del mismo un tipo “7: General Rail Track Joint” y una posición longitudinal de 1.28 m, tal y como se muestra en la figura 4.16:

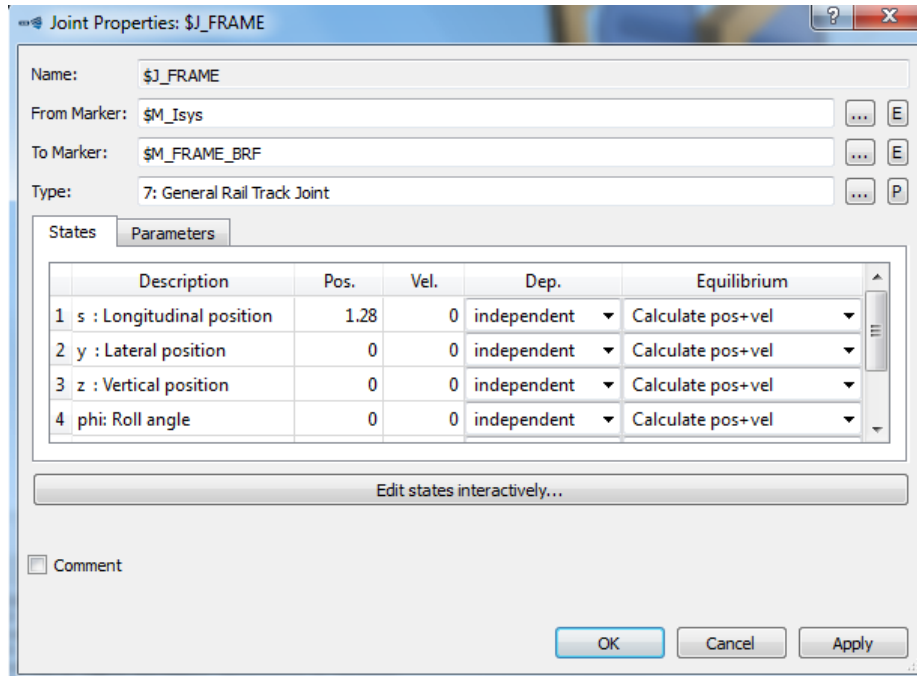


Figura 4.16. Condiciones de contorno y posición del bogie.

El bastidor del bogie debe mostrarse tal y como se muestra en la figura 4.17.

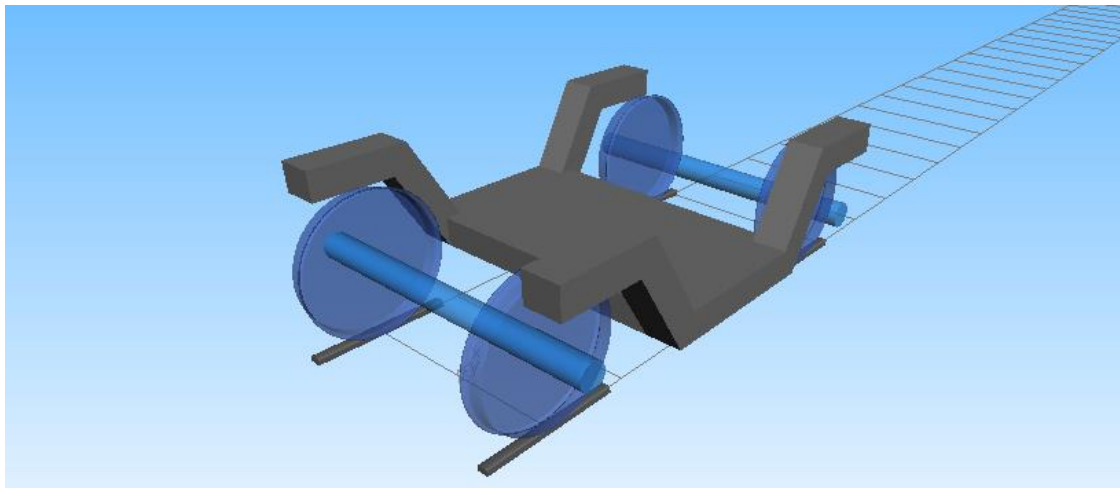


Figura 4.17. Conjunto bogie mas ejes montados.

- **Creación de los “Markers” sobre el bastidor del bogie:** El bastidor del bogie, requiere la especificación de una serie de marcadores para unirlos con las ruedas por su parte inferior (suspensión primaria) y, también, para unirlos con el coche por la parte superior del bogie mediante su cabezal (suspensión secundaria). Los “Markers” que se han de crear son los que aparecen en la tabla y, para su creación, se debe hacer “click” derecho

sobre la pestaña “Markers”, dentro de la rama de “Bodies” correspondiente con el bastidor del bogie, y seleccionar la opción “Create Marker...”.

Tabla 4.4. Marcadores suspensión secundaria.

Nombre del marcador	Posición
\$M_FRAME_ PrimSpring_FR	(1.28, 1, -0.88)
\$M_FRAME_ PrimSpring_FL	(1.28, -1, -0.88)
\$M_FRAME_ PrimSpring_RR	(-1.28, 1, -0.88)
\$M_FRAME_ PrimSpring_RL	(-1.28, -1, -0.88)
\$M_FRAME_ PrimDamp_FR	(1.28, 1, -0.88)
\$M_FRAME_ PrimDamp_FL	(1.28, -1, -0.88)
\$M_FRAME_ PrimDamp_RR	(-1.28, 1, -0.88)
\$M_FRAME_ PrimDamp_RL	(-1.28, -1, -0.88)
\$M_FRAME_ SecSpringR	(0, 1, -0.525)
\$M_FRAME_ SecSpringL	(0, -1, -0.525)
\$M_FRAME_ SecDampLatR	(0, 0.23, -0.7)
\$M_FRAME_ SecDampLatL	(0, -0.23, -0.7)
\$M_FRAME_ SecDampVertR	(0, 1.3, -0.4)
\$M_FRAME_ SecDampVertL	(0, -1.3, -0.4)
\$M_FRAME_ SecRoll	(0, 0, -0.8725)
\$M_FRAME_ TractionRod	(0, 0, -0.6)
\$M_FRAME_ Bumpstop	(0, 0, -0.8725)

Todos estos “Markers” corresponden a la suspensión primaria y a la suspensión secundaria, y son todos ellos del tipo “Identity Matrix”.

- **Suspensión primaria:** Una vez creados los “Markers” del bastidor bogie y de las ruedas, se puede modelar la suspensión primaria por completo, la cual está compuesta por cuatro resortes y cuatro amortiguadores. El modelado de los resortes de la suspensión primaria, se realiza de forma análoga para todos y cada uno de ellos.

Por ejemplo, para el modelado del resorte frontal derecho (FR) se crea un nuevo “Force element” al que se le asocia el nombre basado en los marcadores que utiliza dicho resorte, en este caso “\$F_PrimSpring_FR”. Una vez hecho esto, en la ventana de propiedades del resorte, se establece el par de marcadores correspondiente con el mismo, se especifica el tipo de elemento “86: Spring-Damper Ser/Par”, y se introduce el resto de parámetros que aparece en la figura 4.18 (los parámetros que no se muestran en dicha figura se consideran nulos). Esta operación ha de repetirse análogamente en los tres resortes restantes de la suspensión primaria.

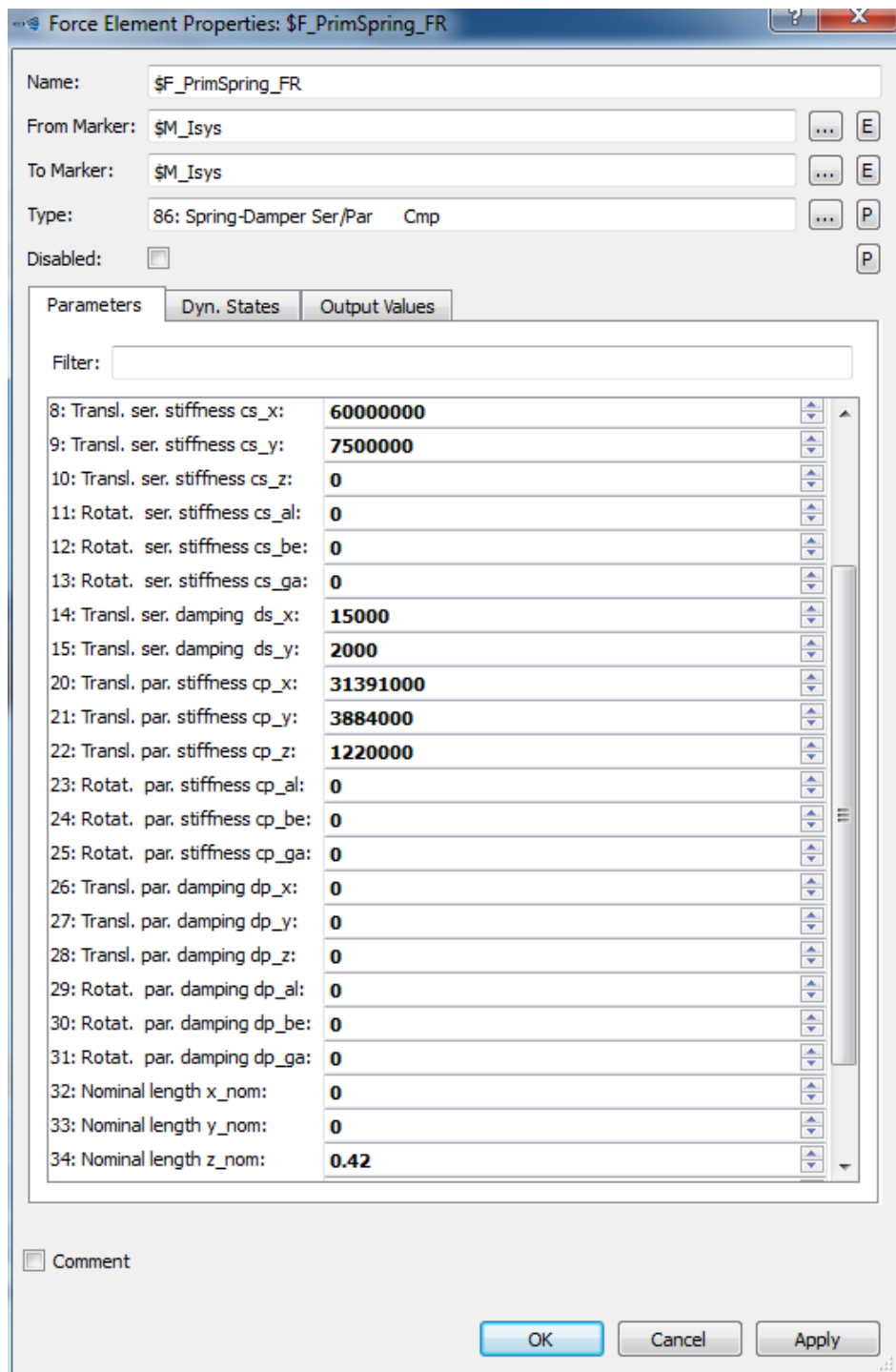


Figura 4.18. Características de los resortes de la suspensión primaria.

Para el modelado de los amortiguadores de la suspensión primaria, el proceso es similar al efectuado con los resortes anteriormente, sin embargo, antes de proceder a crear un nuevo “Force element”, se ha de importar la función que establece el comportamiento del mismo. Para ello, haciendo “click” en el botón derecho, en el modelo con el que estamos trabajando denominado “Bogie”, se selecciona la opción “Create”, y a continuación, “Input Function...”.

De este modo, se accede a la ventana de propiedades del “Input Function”, al que se le asigna el nombre de (“\$I_PrimDamp_Vert_d”), donde en el apartado “File”, y se selecciona el archivo correspondiente con la función de amortiguación de la suspensión primaria, en este caso “PrimDamp_Vert_d.if2” tal y como se muestra en la figura 4.19.

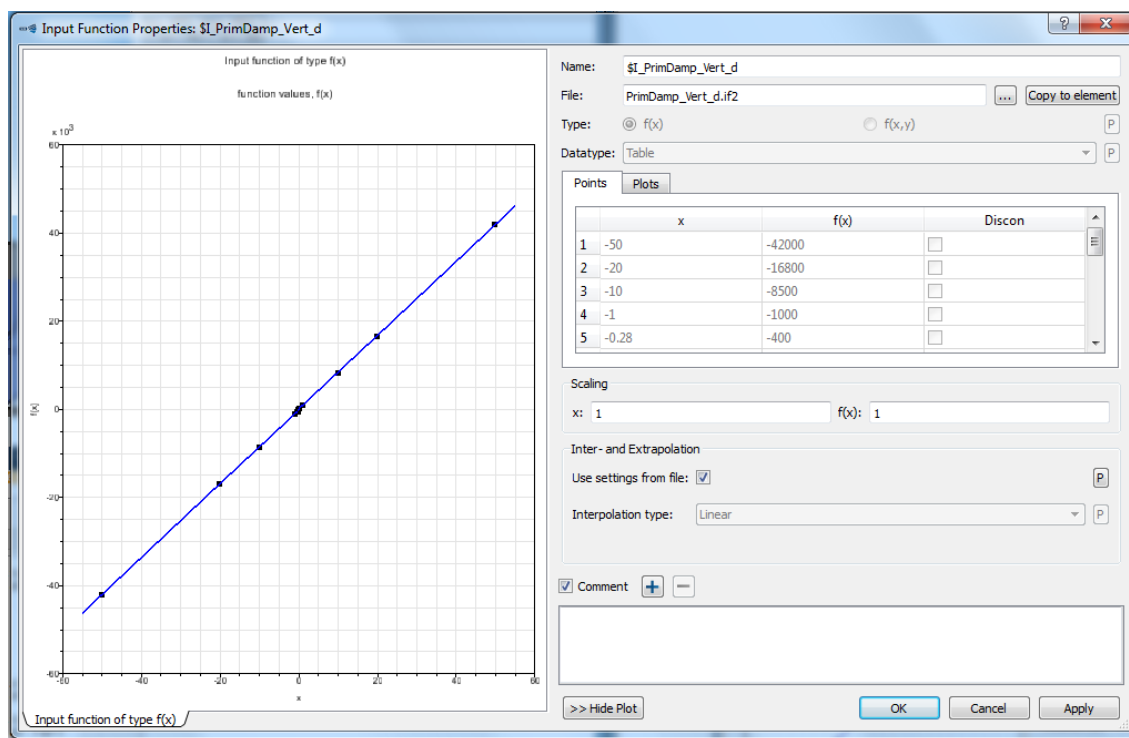


Figura 4.19. Función de los amortiguadores de la suspensión primaria.

Una vez se ha importado la función, se pueden crear los amortiguadores de la suspensión primaria. Para ello, ahora sí, se crea un nuevo “Force element” para el amortiguador de la suspensión primaria, en este caso, por ejemplo para empezar, se escoge el amortiguador frontal derecho, con su nombre asociado correspondiente (“\$F_PrimDamp_FR”). Se especifica el tipo de elemento, en este caso “6: Spring-Damper Serial PtP”, la función que determina el comportamiento del amortiguador y que se crea en el paso anterior, y el resto de parámetros que se muestran en la figura 4.20.

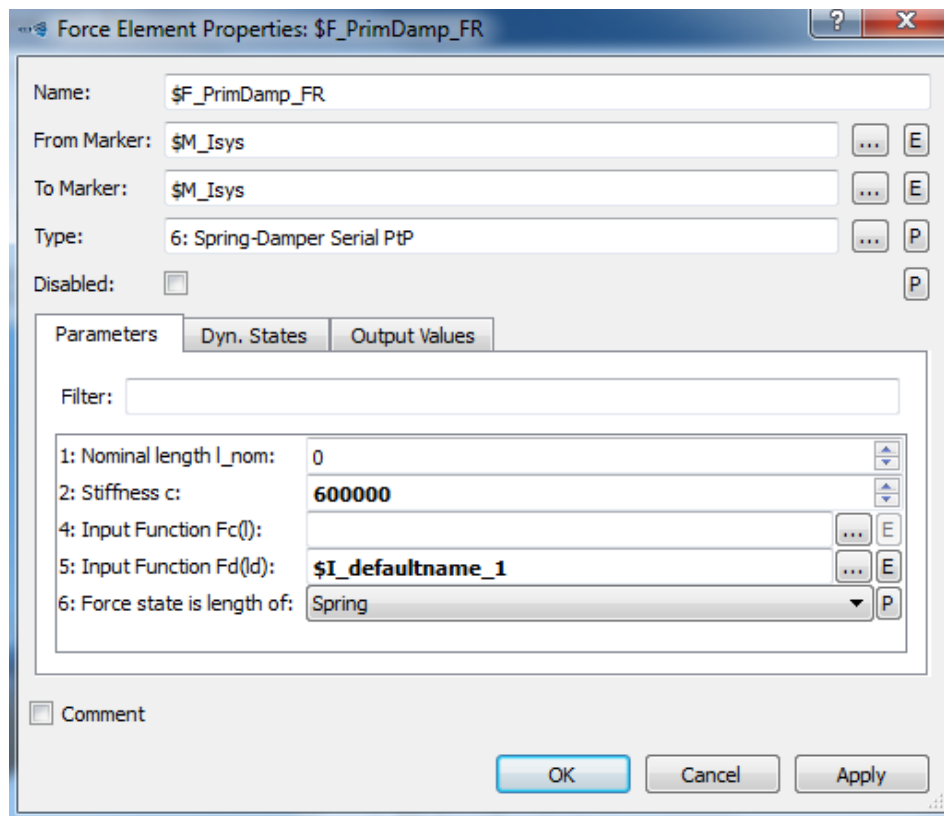


Figura 4.20. Características de los amortiguadores de la suspensión primaria.

Este proceso se ha de repetir análogamente para los tres amortiguadores restantes de la suspensión secundaria.

- **Modelado del cabezal fijo del bogie:** el cabezal fijo es un cuerpo virtual, de masa infinitesimal, cuya única función es la de unir el bogie al vehículo ferroviario de una manera más sencilla. El cabezal ha de tener cero grados de libertad, ya que está fijo al vehículo ferroviario en todo momento.

Para comenzar con el modelado del cabezal se crea un nuevo “Body” para el mismo, al que se le asocia el nombre de “\$B_dummy”, una vez hecho esto, como ya es habitual, se especifican los valores de masa e inercia de la tabla 4.5 correspondientes con el cabezal, tal y como se muestra en la figura 4.21.

Tabla 4.5. Valores de inercia y masa para el cabezal fijo del bogie.

Masa:	2615 kg
Inercia en el eje X:	1722 kg · m ²
Inercia en el eje Y:	1476 kg · m ²
Inercia en el eje Z:	3076 kg · m ²
Coordenadas centro de gravedad:	(0, 0, -1.22) m

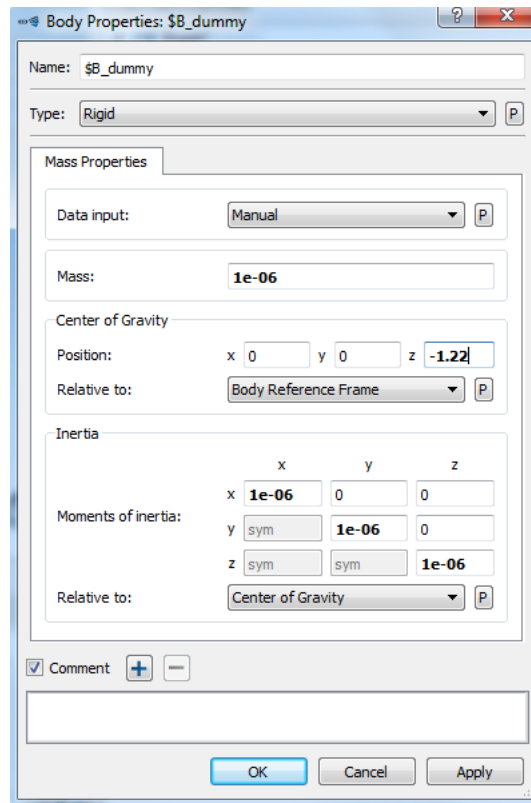


Figura 4.21. Valores de masa e inercia para el cabezal fijo del bogie.

A continuación, se debe especificar la geometría del cabezal. Para ello, haciendo “click” en “Geometry” se accede al archivo “\$P_dummy”, y se introducen los valores que aparecen en la figura 4.22.

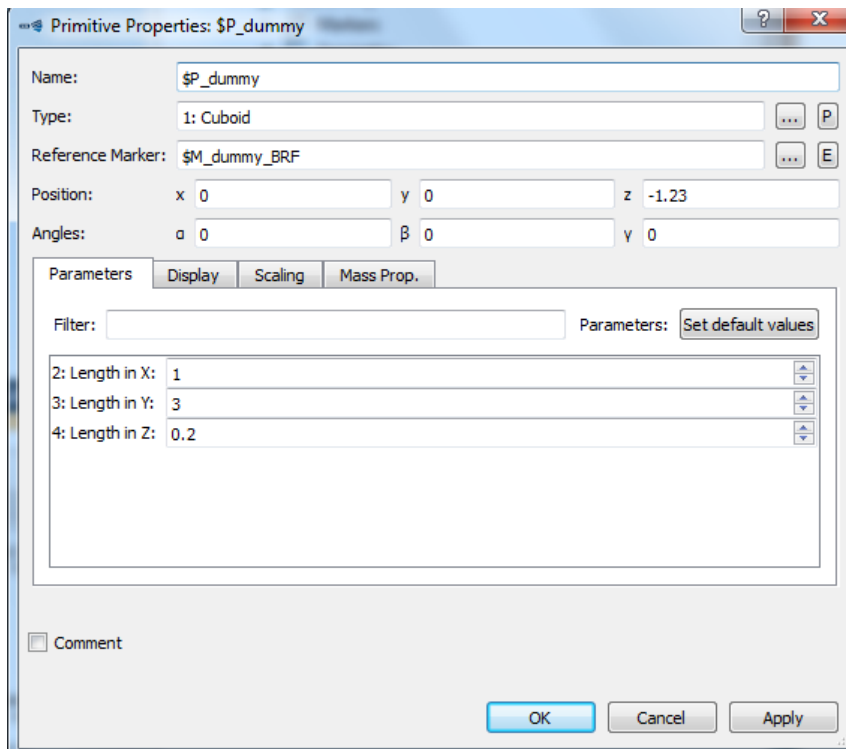


Figura 4.22. Geometría del cabezal del bogie.

Por último, se ha de posicionar el cabezal fijo, para ello, haciendo “click” en “Joints”, se selecciona el archivo “\$J_dummy”, se introducen los valores que especifican la posición del cabezal en la ventana que aparece en la figura 4.23, y sobre todo, se ha de especificar que los grados de libertad para el cabezal son nulos “0: Degrees of Freedom”.

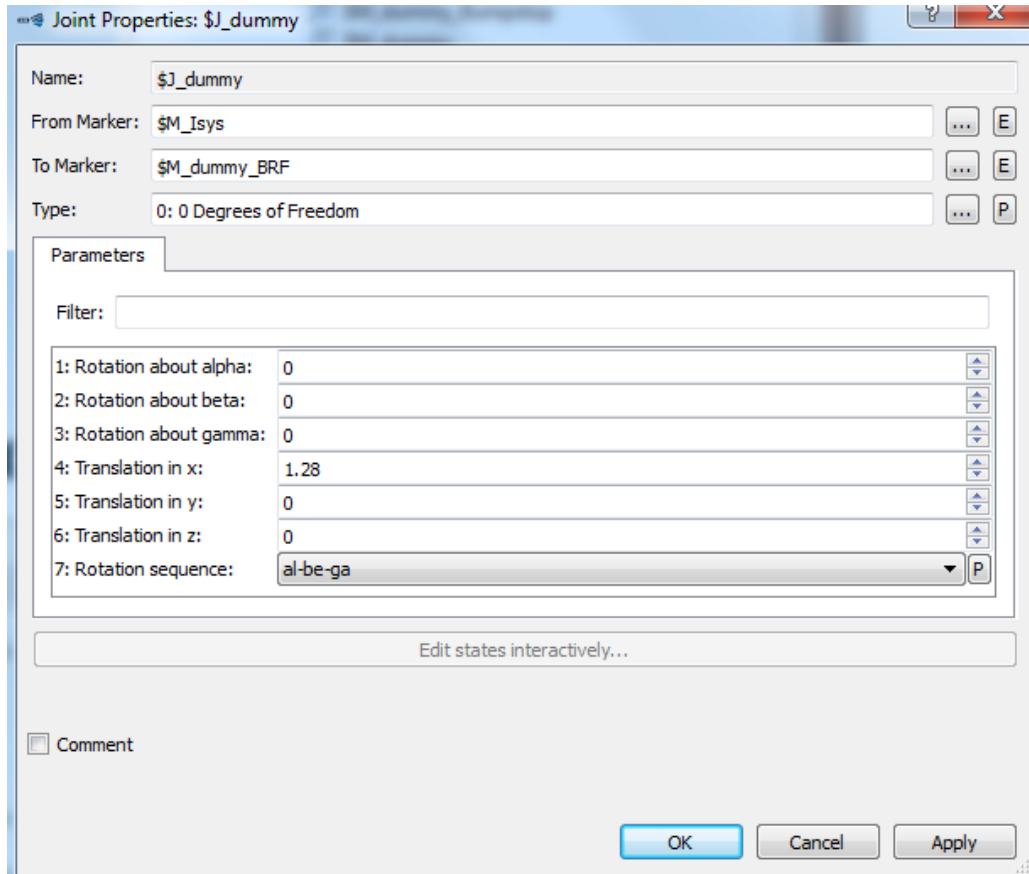


Figura 4.23. Condiciones de contorno y posición del cabezal del bogie.

El modelado del bogie alcanzado este punto debe mostrarse tal y como aparece en la figura 4.24.

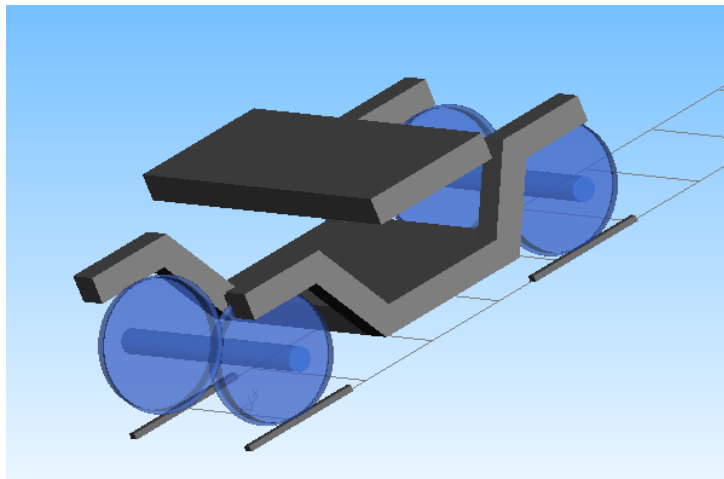


Figura 4.24. Conjunto bogie, mas ejes montados, mas cabezal fijo.

- **Creación de los marcadores del cabezal fijo:** los “Markers” que tiene el cabezal fijo para unirse al bastidor del bogie son seis en total: dos debidos a los resortes de la suspensión secundaria y cuatro por los cuatro conjuntos de amortiguador más el resorte en serie de la suspensión secundaria (dos laterales y dos verticales).

Si el modelo de vehículo que se desea modelizar posee suspensión activa lateral (como es el caso que se plantea en este documento), los dos conjuntos de amortiguador más resorte en serie laterales, se sustituyen por dos amortiguadores acompañados cada uno de ellos de un actuador en paralelo, tal y como se indica más adelante en este mismo apartado.

Aunque el estudio, modelado y simulación de un vehículo ferrocarril dotado con suspensión lateral activa es el objetivo principal del uso de Simpack como software, es importante también, modelar el mismo vehículo, con las mismas características pero carente de suspensión activa, para poder comparar los resultados obtenidos en la simulación una vez completado el modelado de ambos tipos de vehículos.

Por esta razón, a partir de este punto, en los pasos de modelado donde se requiere hacer distinción entre el vehículo provisto de suspensión activa, y el provisto de suspensión pasiva. Por lo tanto se indican a partir de este punto los procesos a realizar tanto para un caso, como para el otro.

Los marcadores que se han de crear en el cabezal fijo aparecen en la tabla 4.6, para la creación de los mismos en la pestaña “Bodies” se accede al archivo “\$B_dummy” y dentro del apartado Markers se crean los marcadores necesarios haciendo “click” derecho seguido de la opción “Create Marker...”

Tabla 4.6. Marcadores del cabezal fijo del bogie.

Nombre del marcador	Posición
\$M_dummy_SecR	(0, 1, -1.13)
\$M_dummy_SecL	(0, -1, -1.13)
\$M_dummy_DampRVert	(0, 1.3, -0.925)
\$M_dummy_DampLVert	(0, -1.3, -0.925)
\$M_dummy_DampRLat	(0, 0.665, -0.7)
\$M_dummy_DampLLat	(0, -0.665, -0.7)
\$M_dummy_SecRoll	(0, 0, -0.8725)
\$M_dummy_TractionRod	(0, 0, -0.6)
\$M_dummy_Bumpstop	(0, 0, -0.8725)

Al igual que en el caso del bogie, todos los marcadores han de ser del tipo “1: Identity Matrix”.

- **Suspensión secundaria:** para comenzar con el modelado de la suspensión secundaria se crean los resortes de la suspensión secundaria. Para ello, se

crea un nuevo “Force element” para cada resorte asociando el nombre que le corresponda a cada uno (“\$F_SecR” ó “\$F_SecL”), y se introducen sus datos correspondientes en la ventana de propiedades tal y como se muestra en la figura 4.25 y de forma análoga a como se efectuó con la suspensión primaria.

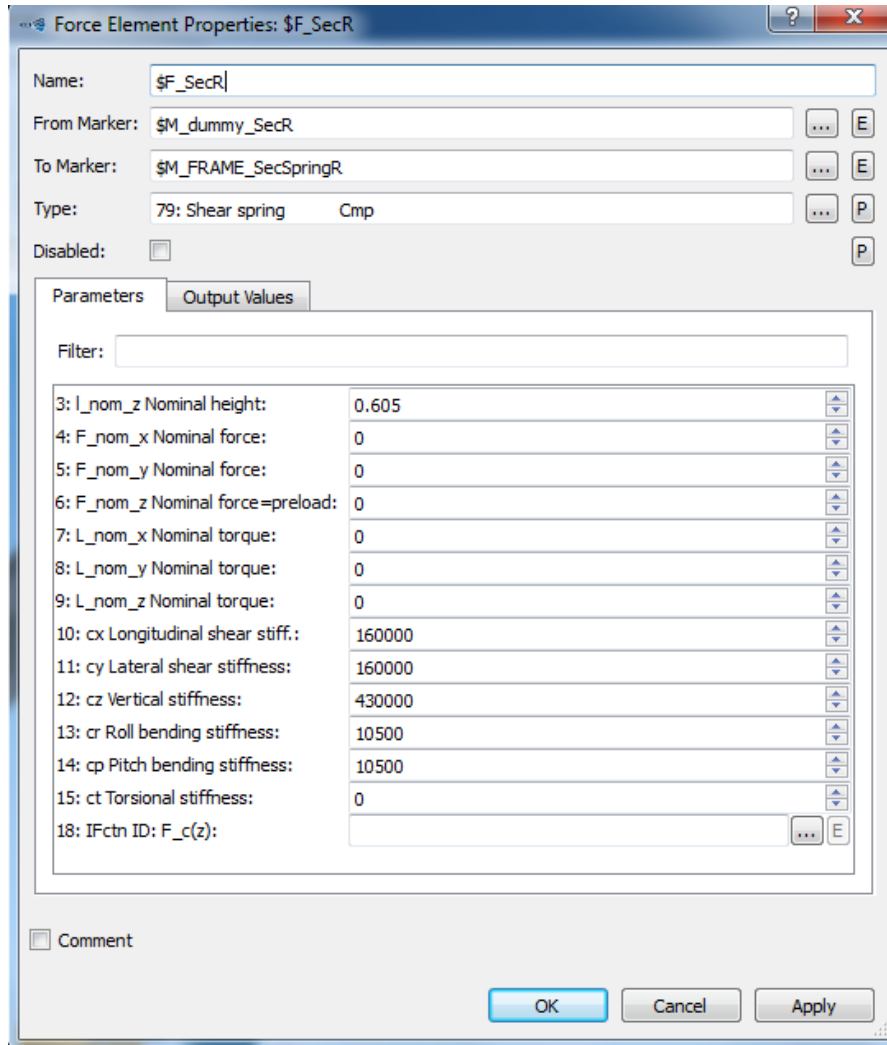


Figura 4.25. Características de los resortes de la suspensión secundaria.

Seguidamente, se crean los amortiguadores verticales, de forma análoga a como ya se hizo con los amortiguadores de la suspensión primaria, es decir, se crea un nuevo “Input Function” al que se le asocia el nombre (“\$I_SecDamp_Vert_d”), y en la ventana de propiedades se establece como función de comportamiento de los amortiguadores en la opción “File”, el archivo con el nombre “SecDamp_Vert_d.if2”, tal y como se muestra en la figura 4.26.

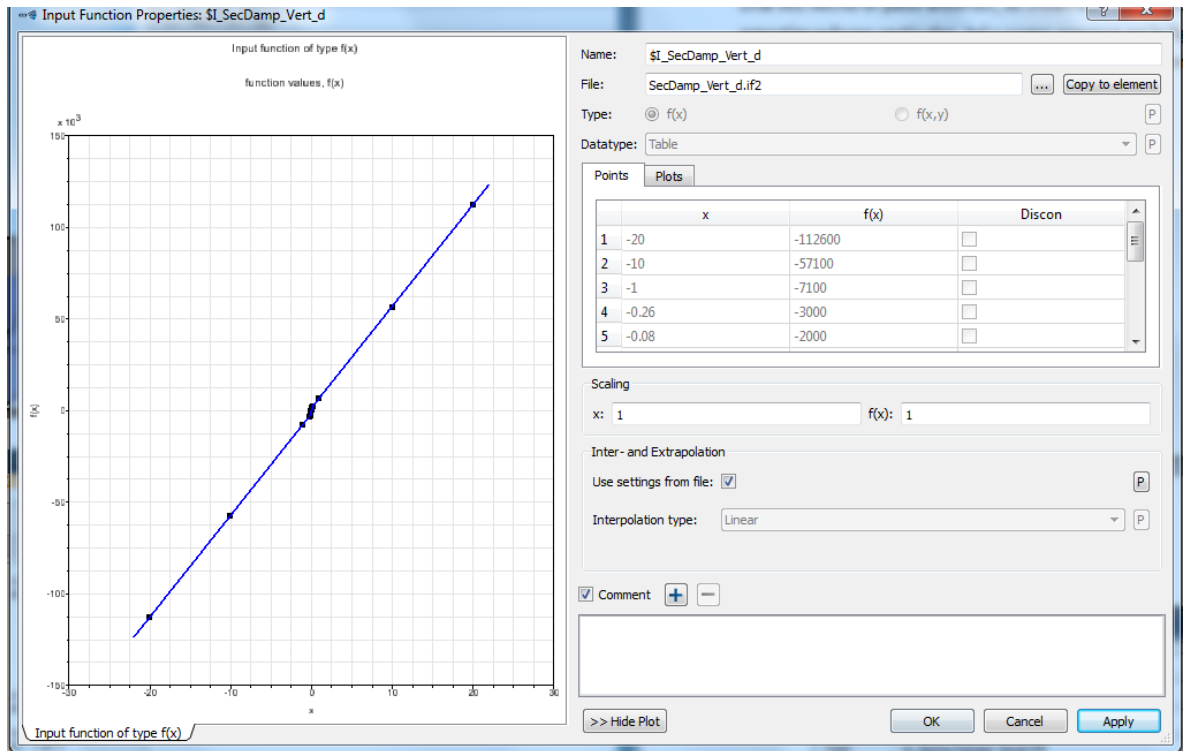


Figura 4.26. Función de los amortiguadores de la suspensión secundaria.

Una vez hecho el paso anterior, se crean los “Force Elements” correspondientes a los dos amortiguadores verticales, tal y como aparece en la figura 4.27 y de forma análoga, nuevamente, a como se efectuó en la suspensión primaria.

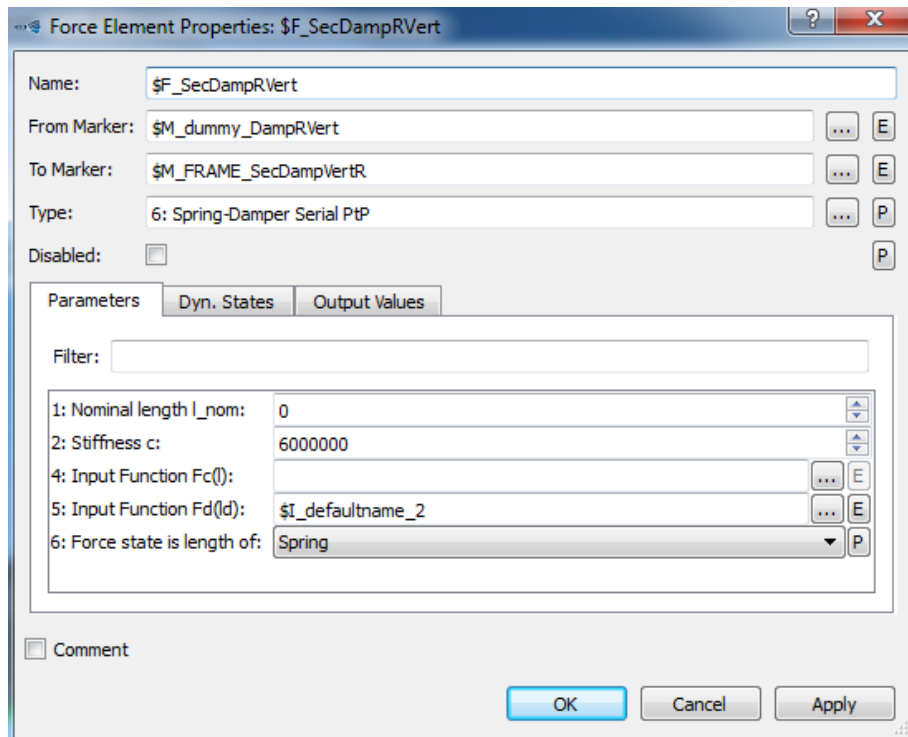


Figura 4.27. Configuración de los amortiguadores verticales de la suspensión secundaria.

Para el caso del tren provisto de suspensión pasiva lateral, la creación de los amortiguadores laterales de la suspensión secundaria es igual a la de los amortiguadores verticales que se acaba de mostrar, se crea un nuevo “Input Function” con el nombre “\$I_SecDamp_Lat_d” y, como novedad, se ha de prestar especial atención al orden en el que se introducen los marcadores del amortiguador derecho, respecto al del amortiguador izquierdo, ya que no es el mismo tal y como se muestra en la figura 4.28.

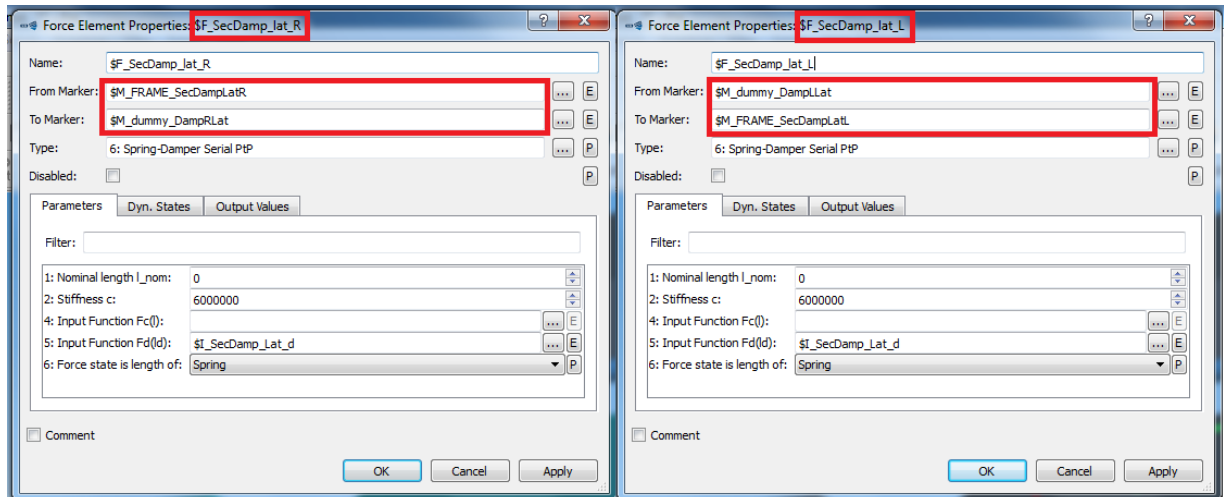


Figura 4.28. Configuración de los amortiguadores laterales de la suspensión secundaria.

Quedando de esta forma, una configuración para los amortiguadores laterales en el orden que se muestra en la figura 4.29.

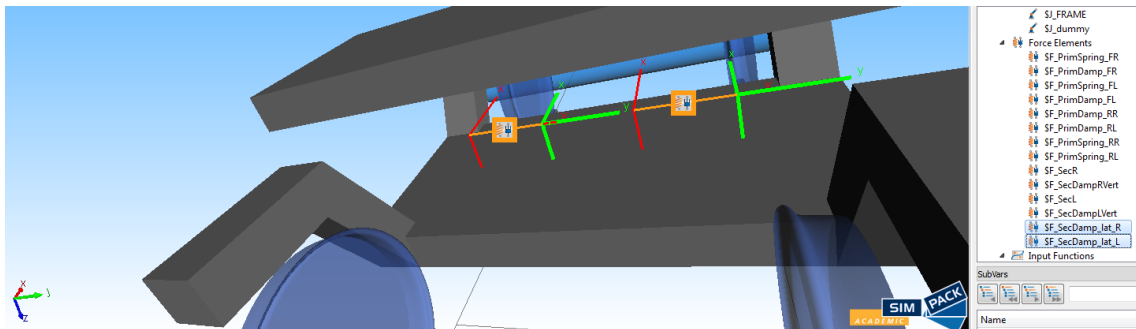


Figura 4.29. Detalle de la colocación de los amortiguadores laterales de la suspensión secundaria.

Para el caso del tren provisto de suspensión activa, los “Force Elements” a crear en lugar de los mostrados anteriormente en la figura 4.28, serían los dos que se muestran en la figura 4.30. Nótese que, para el caso de la suspensión activa, se elimina el resorte que va a acompañando al amortiguador (Type: Spring-Damper Serial PtP) y se deja, únicamente, un amortiguador como elemento de suspensión (Type: Damper PtP), cuya fuerza de amortiguamiento ha sido revisada para trabajar junto al actuador correspondiente (los actuadores se modelizarán mas adelante para mayor sencillez) [10].

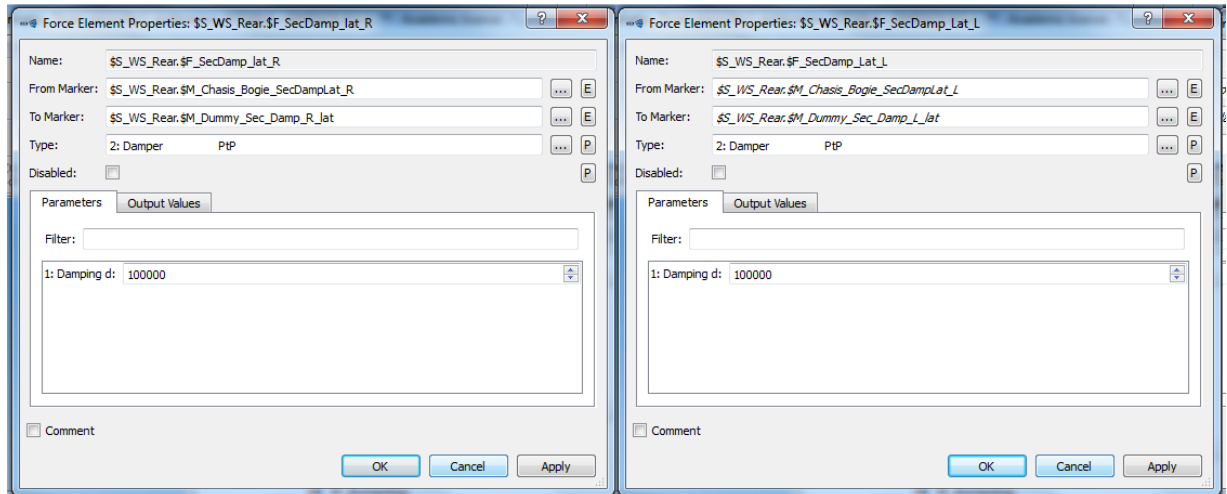


Figura 4.30. Configuración de los amortiguadores laterales de la suspensión secundaria activa.

Seguidamente, tanto para el tren con suspensión activa, como para el provisto de suspensión pasiva, se crean los “Force Elements” correspondientes con la barra antitorción (antirollbar) y los parachoques que evitan los impactos entre el bogie y el tren (bumpstop), figuras 4.31 y 4.32 respectivamente. Para el caso del “bumpstop” se debe crear previamente su correspondiente “Input Function”, como ya se ha hecho para el caso de los amortiguadores.

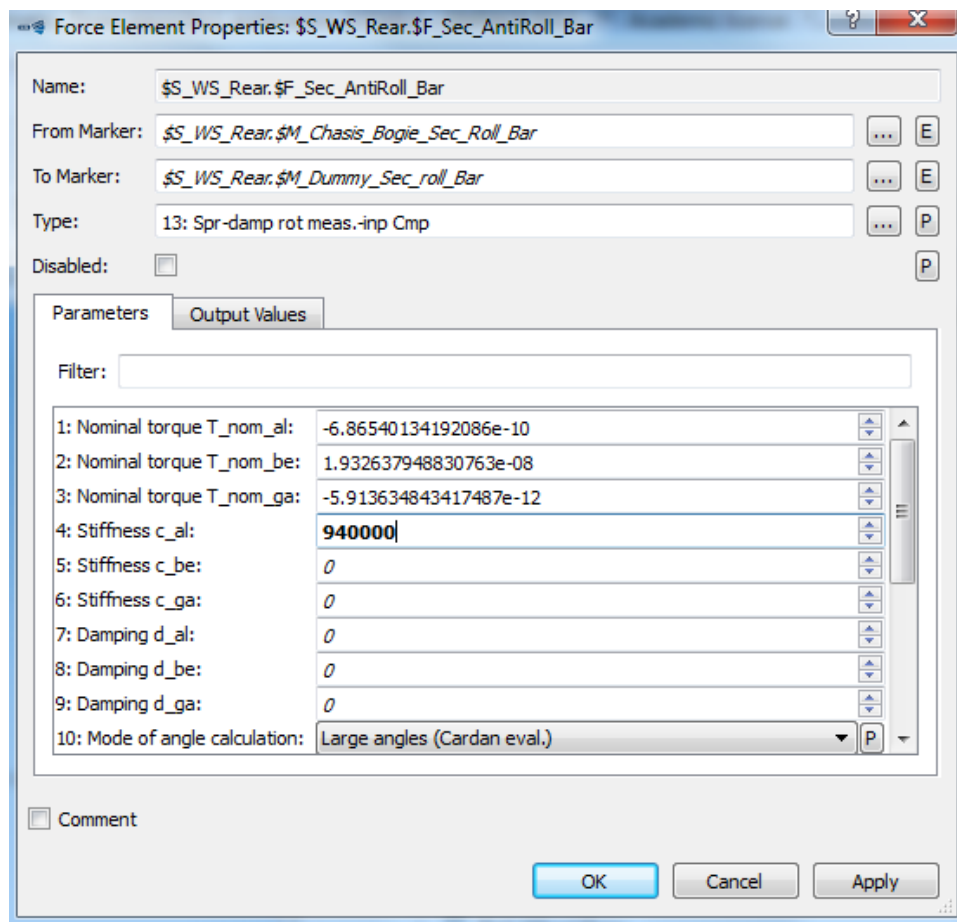


Figura 4.31. Características de la barra de torsión.

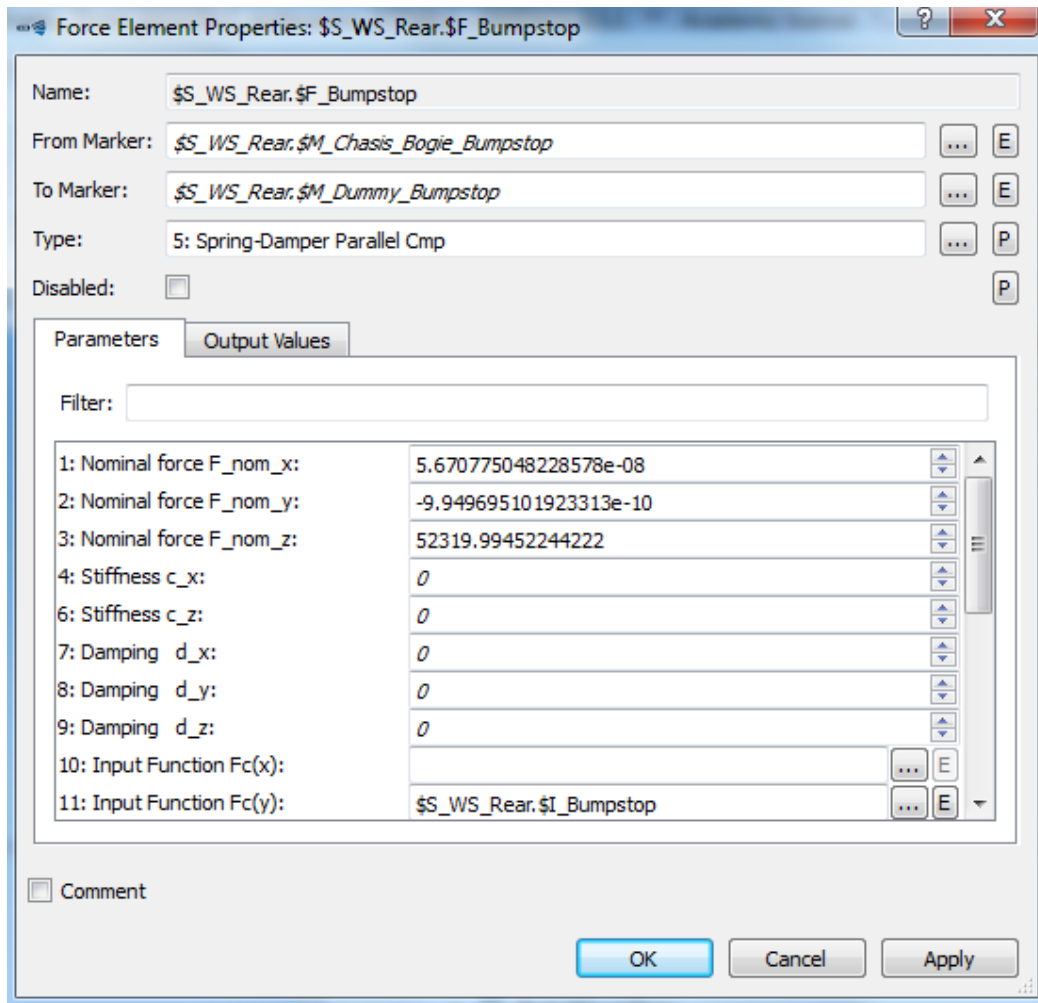


Figura 4.32. Características del parachoques.

Finalmente, una vez alcanzado este punto, se guarda el modelo con el nombre de Bogie (como se mencionó al principio), y se guarda en la carpeta subestructuras.

4.3.2 Modelado del vehículo ferrocarril completo

Una vez mostrados los pasos para la modelización completa del bogie, con sus diferentes partes como suspensiones, cabezales y ejes montados, se muestra a continuación el modo en que se modela el conjunto completo del vehículo ferroviario, es decir, el coche junto a sus dos bogies completos.

- **Creación del nuevo modelo:** en primer lugar, se crea un nuevo modelo al que se le asocia el nombre de “Coche”. Posteriormente, al igual de como se hizo con el bogie, se invierte el sentido de la gravedad, se actualiza el directorio del “Serch Path” para que el software reconozca las nuevas subestructuras creadas, se crean los archivos “Track” y “Rail”

correspondientes, y se borra el “Body” con forma de cubo creado por defecto por el software.

- **Importación de los bogies como subestructuras:** seguidamente, se importan ambos bogies, el delantero y el trasero, de forma análoga a como se hizo con los ejes montados en el caso del modelado del bogie. Para ello, se crean dos subestructuras y se importa el modelo del bogie, tal y como se muestra en la figura 4.33. El nombre elegido para ambas subestructuras es “Bogie_delantero” y “Bogie_trasero”.

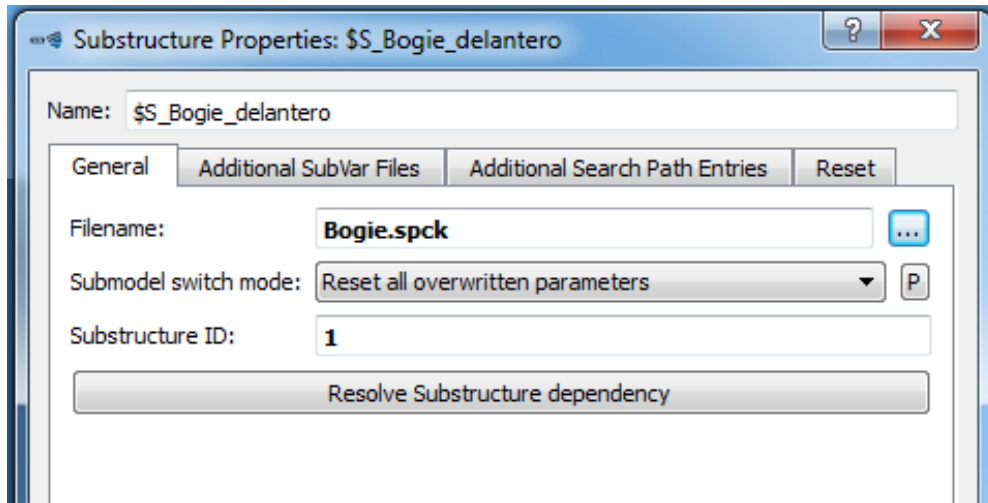


Figura 4.33. Importación de las subestructuras.

Una vez creadas las dos subestructuras, se modifica la cota en dirección X (dirección longitudinal) de los “Joints” asociados con el bogie delantero, es decir, los archivos “\$J_FRAME”, “\$J_dummy”, “\$S_WSF.\$J_Wheelset” y “\$S_WSR.\$J_Wheelset” correspondientes con el bogie delantero. A todos ellos, se les añade un valor de 19 m en la dirección positiva del eje X (figura 4.34), ya que esta es la cota que tendrá el vehículo ferroviario entre sus dos bogies.

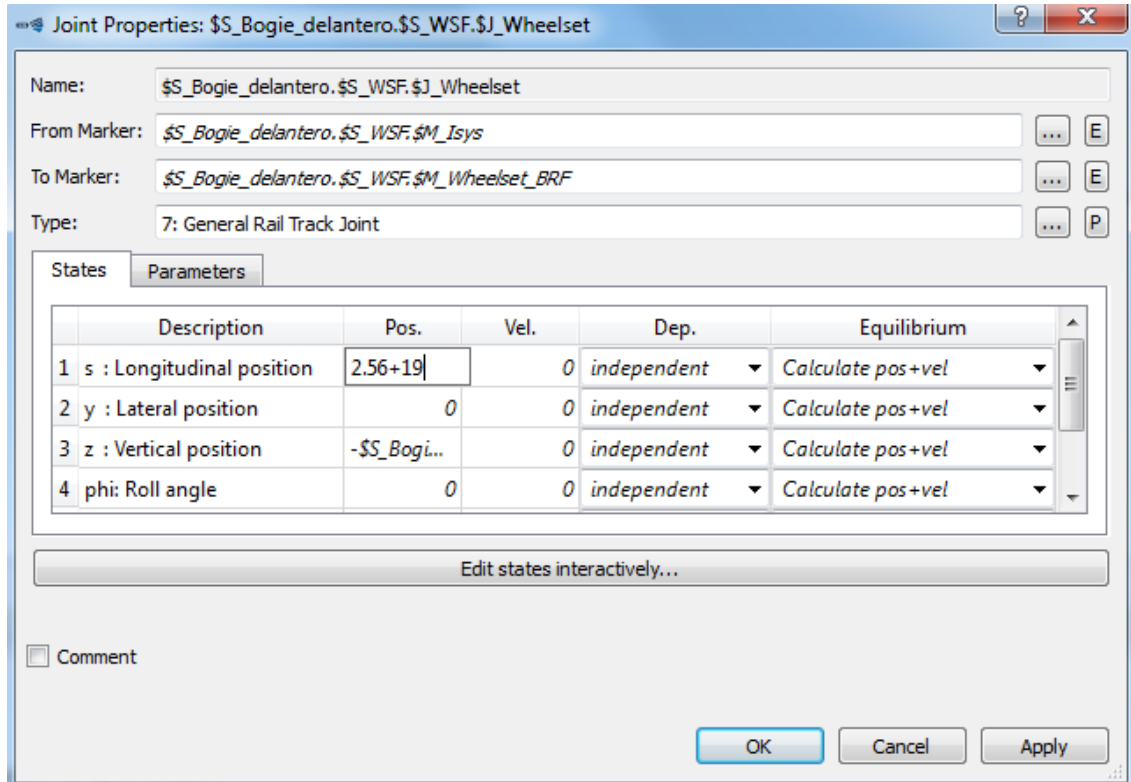


Figura 4.34. Modificación de la posición del bogie delantero.

- **Creacion del “Body”:** el siguiente paso es la creación del coche, para ello, se crea un nuevo “Body” con el nombre “\$B_Coche”, al que se le asociarán los valores que aparecen en la tabla 4.7, tal y como se muestra en la figura 4.35, haciendo especial énfasis, en no olvidar seleccionar la opción “Centre of Gravity” en el apartado de “Inertia”.

Tabla 4.7. Valores de inercia y masa para el coche.

Masa:	32000 kg
Inercia en el eje X:	56800 kg · m ²
Inercia en el eje Y:	19700000 kg · m ²
Inercia en el eje Z:	19700000 kg · m ²
Coordenadas centro de gravedad:	(0,0,-1.8) m

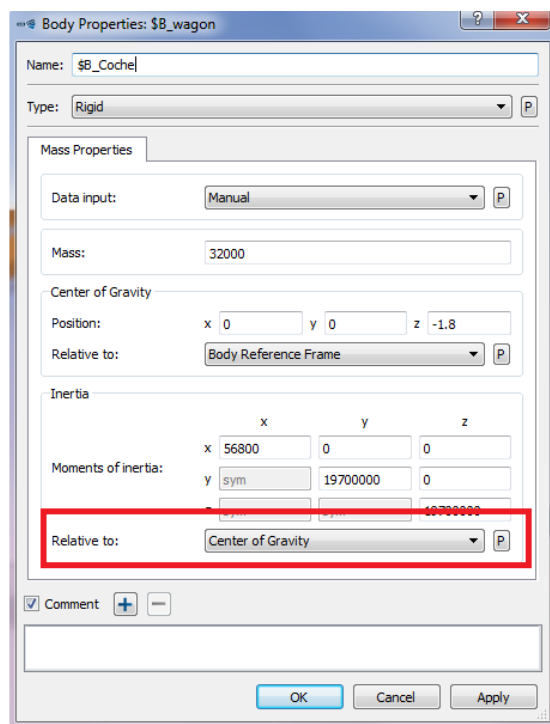


Figura 4.35. Valores de masa, inercia y especificación del centro de gravedad del coche.

Una vez hecho esto se selecciona el archivo correspondiente con la geometría del “Body” que se acaba de crear, en este caso “\$P_Coche” y se establecen las especificaciones que aparecen en la figura 4.36, indicando como tipo de geometría el modelo “21: Wheel Rail Cab”.

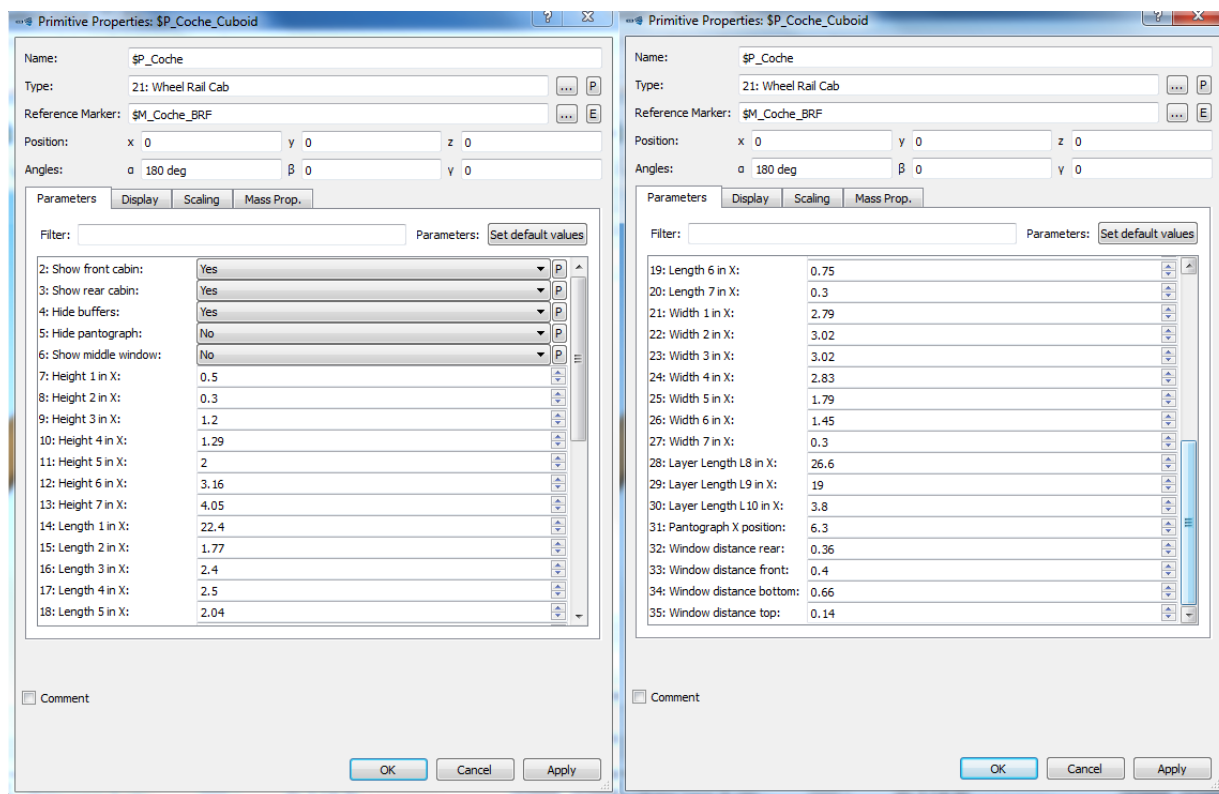


Figura 4.36. Características de la geometría del coche.

- **Creación de los marcadores del coche:** seguidamente, se han de crear los dos marcadores que permiten conectar los cabezales de los bogies con el coche. Para ello, se crean dos nuevos marcadores dentro del “ body” creado anteriormente con el nombre de “\$B_Coche”, con las características que aparecen en la tabla 4.8 y siempre del tipo “1: Identity Matrix”.

Tabla 4.8. Marcadores del coche.

Nombre del marcador	Posición
\$M_Coche_Bogie_Front	(9.5, 0, 0)
\$M_Coche_Bogie_Rear	(-9.5, 0, 0)

- **Modificación final de los “Joints”:** una vez creados los marcadores anteriores, se deben modificar los “Joints” correspondientes a los cabezales de los bogies tanto delantero, como trasero, de la forma en la que se muestra en la figura 4.37.

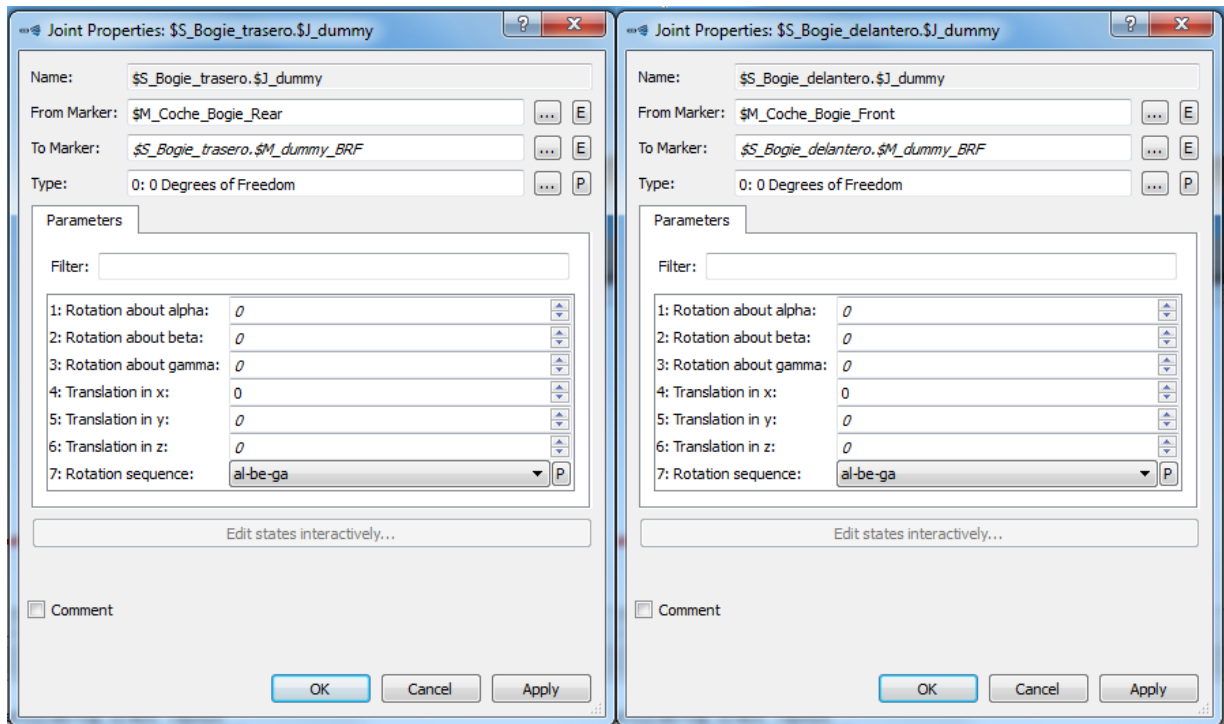


Figura 4.37. Modificación de los “joints” correspondientes con los cabezales fijos de los bogies.

También se ha de modificar el “Joint” correspondiente con el Vehículo ferroviario de la manera en la que se muestra en la figura 4.38, seleccionando el tipo “9: Rheonomic Rail Track Joint”.

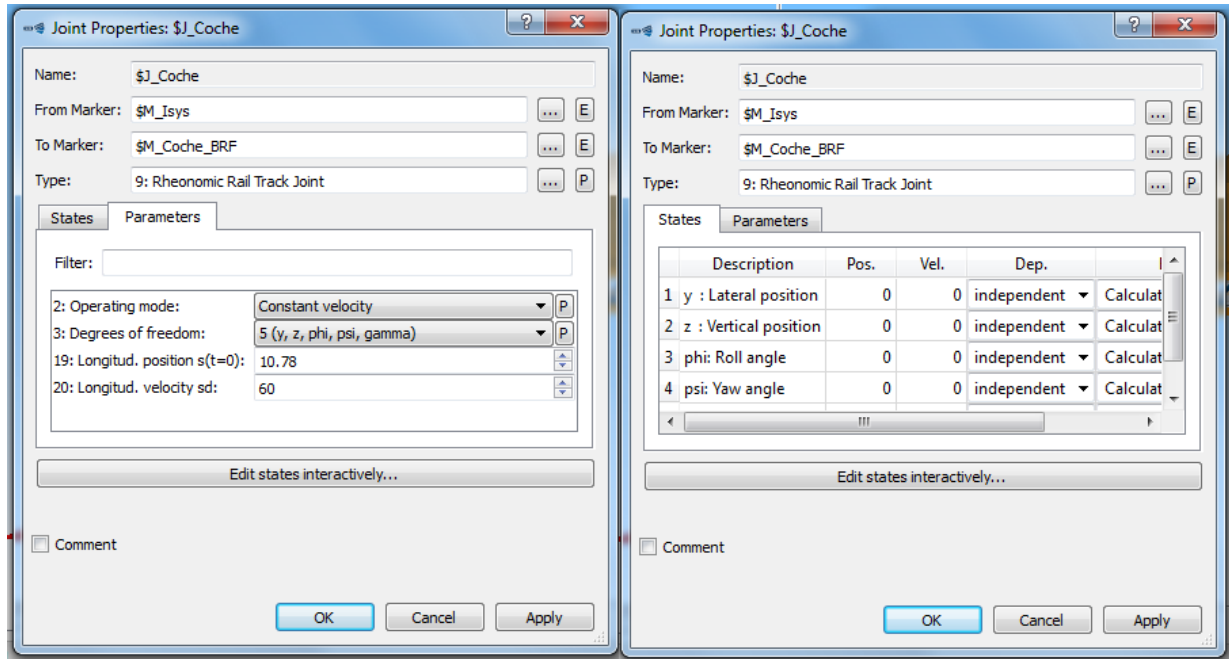


Figura 4.38. Modificación del "Joint" correspondiente con el coche.

Finalmente, una vez efectuados todos los pasos anteriores, el modelado del vehículo ferroviario está finalizado, y debe aparecer en la interfaz de la manera en la que se muestra en la figura 4.39.

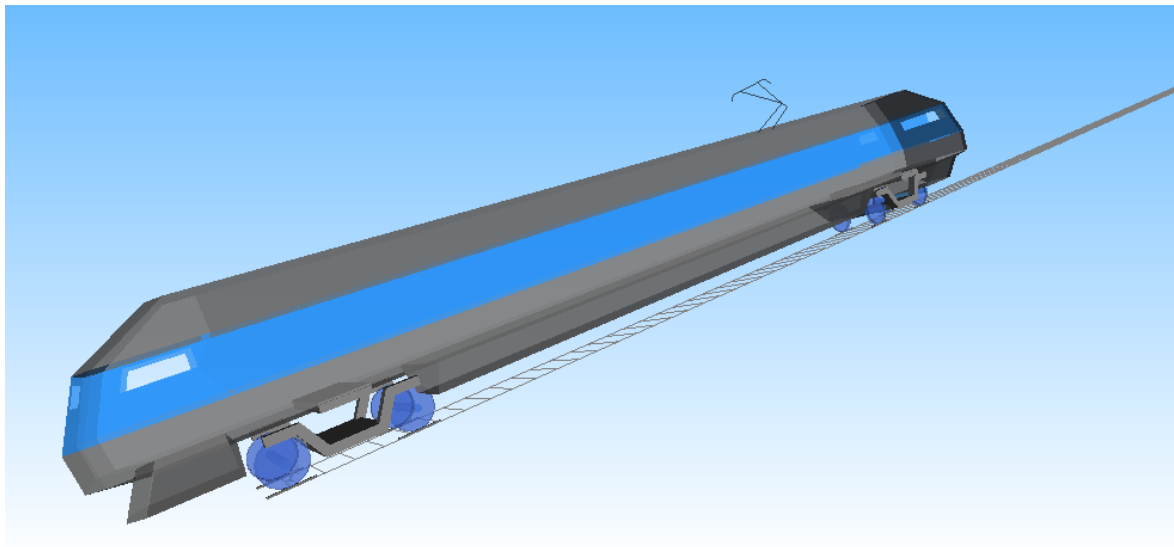


Figura 4.39. Modelado del vehículo ferroviario completo.

4.3.5 Modelado de los elementos adicionales referentes a la suspensión activa lateral

Dentro del apartado 4.3.3, cuando se describe el modelado de la suspensión secundaria, se describe el modelo a seguir para la creación de los amortiguadores laterales que trabaja en conjunto con los actuadores

correspondientes, formando de esta manera la suspensión activa lateral del vehículo.

En este punto se muestra el procedimiento a seguir para la modelación de dichos actuadores de los bogies mediante Simpack. Además, se indica cómo crear los diversos sensores que se deben incluir en el vehículo para el funcionamiento del controlador.

- **Modelización de los sensores del controlador:** el controlador de la suspensión activa lateral basado en un algoritmo de lógica borrosa, cuyo funcionamiento se explica detalladamente en el capítulo 5 de este documento, está compuesto por dos entradas y por una salida. Dicha salida, es la señal que se manda directamente a los actuadores de la suspensión lateral, y las dos entradas, son las señales proporcionadas por dos tipos de sensores distintos situados en el vehículo ferrocarril (figura 4.40).

El primer tipo de sensores se encarga de medir la posición lateral del bogie con respecto al coche. Cuando el plano vertical de simetría XZ del bogie, coincide con el plano vertical de simetría XZ del coche, el sensor emite una señal nula (figura 4.41).

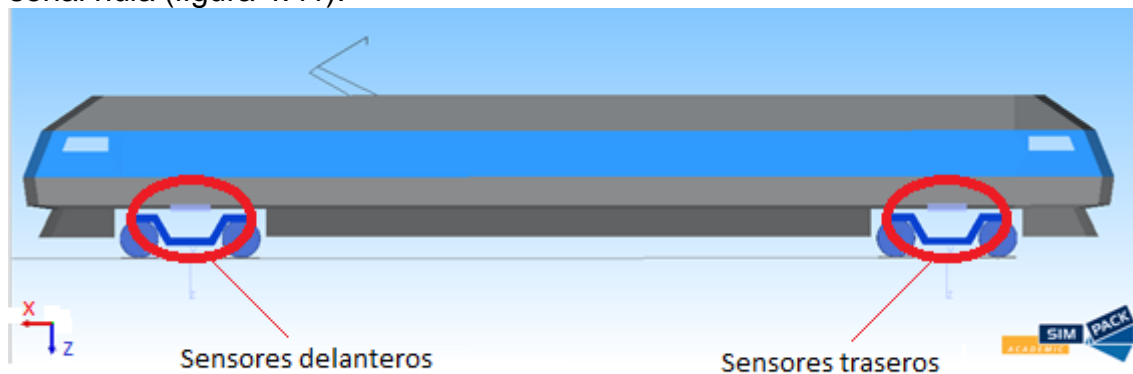


Figura 4.40. Dirección de los ejes X y Z en el vehículo ferroviario y localización de los sensores.

Sin embargo, cuando exista una distancia relativa entre ambos planos, el sensor debe emitir una señal proporcional a dicha distancia relativa.

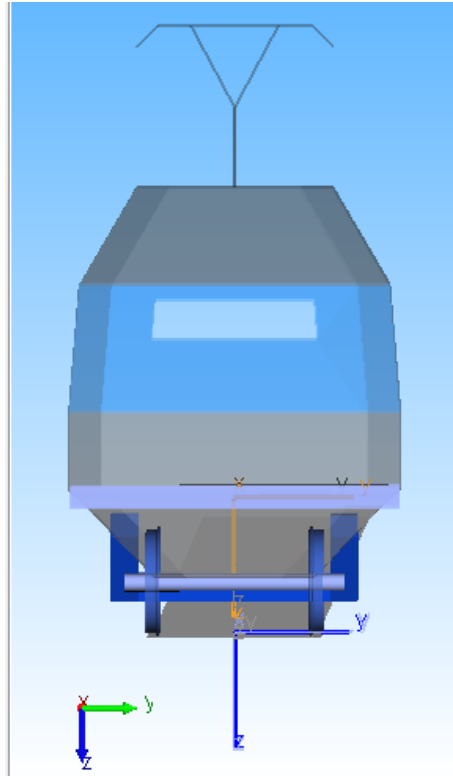


Figura 4.41. Alineación lateral del bogie con respecto al coche.

Para medir dicha distancia relativa, se toma como referencia el marcador “\$M_FRAME_BRF” para el bogie y el marcador “\$M_Coche_Bogie_Front” ó “\$M_Coche_Bogie_Rear” según se trate del bogie delantero o del bogie trasero.

Así pues, midiendo la distancia relativa entre ambos marcadores mencionados anteriormente en el eje Y, se puede calcular la posición lateral del bogie con respecto al coche necesaria como “input” para el controlador. Por lo tanto, se ha de modelizar en Simpack un sensor capaz de medir las distancia en el eje Y entre los marcadores nombrados anteriormente.

Para comenzar la modelización, se ha de tener en cuenta que se necesita un sensor de posición por cada bogie del vehículo, así pues, en este caso, al haberse modelizado un vehículo de dos bogies se necesitarán dos sensores de posición.

Se comienza creando un nuevo “Control Element” haciendo “click” en Edit\Create\Control Element..., asociándole el nombre de “\$C_Sensor_Front”. Posteriormente, en la ventana de propiedades del nuevo elemento, se selecciona como tipo de sensor en la opción “Type”, el modelo “165: Kinematic Measure Sensor”, se indican los marcadores que se desean utilizar como referencia, y se modifican los parámetros correspondientes con el canal 1 (Ch 1), tal y como se muestra en la figura 4.42.

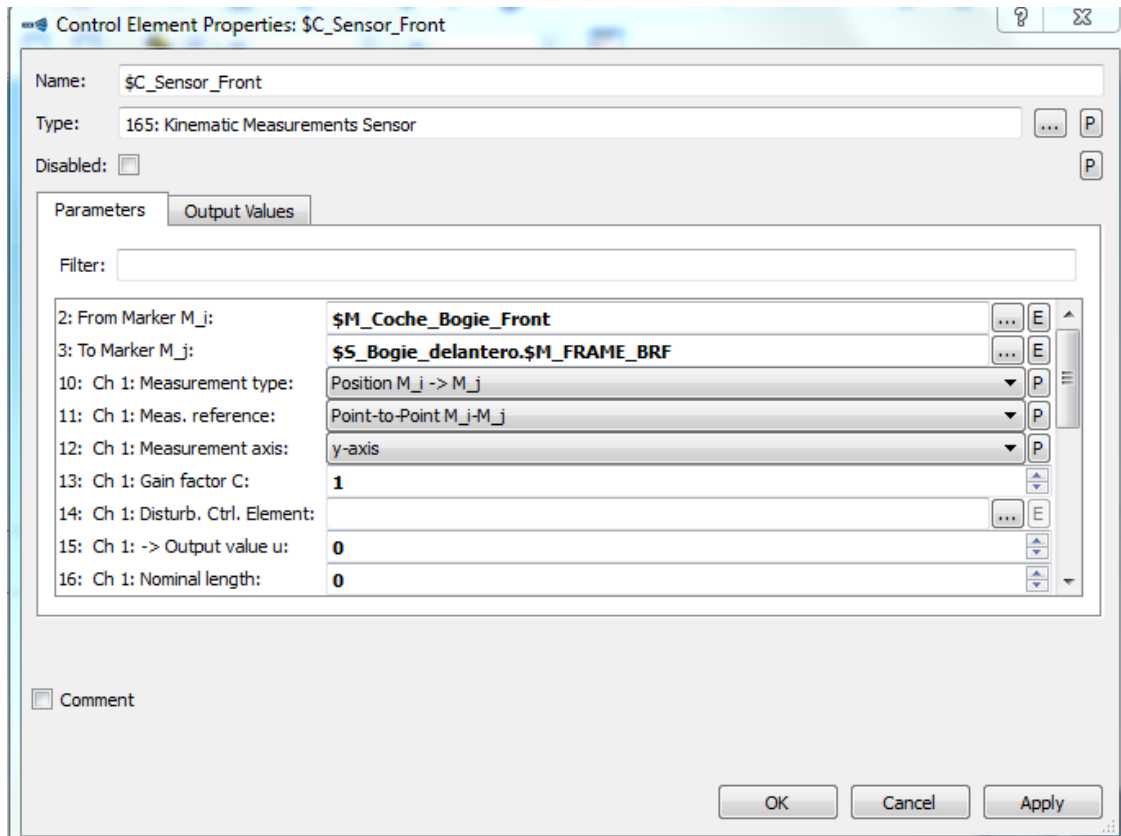


Figura 4.42. Configuración del "Control element" para los sensores de posición.

De esta forma ya está modelizado el sensor de posición relativa entre el bogie delantero y el coche, para el sensor del bogie trasero se actúa de manera análoga, modificando los nombres correspondientes y sustituyendo el marcador de referencia del bogie delantero, por el del bogie trasero.

En cuanto al segundo tipo de sensores necesarios para el funcionamiento del controlador, se trata de sensores que miden la aceleración relativa en el eje Y entre los mismos marcadores utilizados para los sensores que miden únicamente desplazamiento. Estos marcadores son "\$M_FRAME_BRF" y "\$M_Coche_Bogie_Front" ó "\$M_Coche_Bogie_Rear" según se trate del bogie delantero o del trasero respectivamente.

De nuevo, son necesarios dos sensores (uno por cada bogie), y la manera de modelizarlos en Simpack es análoga a la mostrada para los sensores de posición anteriores. Se comienza haciendo "click" en Edit\Create\Control Element..., se crea un nuevo elemento con el nombre "\$C_Sensor_Front_aceleration", en la ventana de propiedades se indica el tipo de sensor "164: Acceleration Sensor", y se especifican los parámetros que se muestran en la figura 4.43.

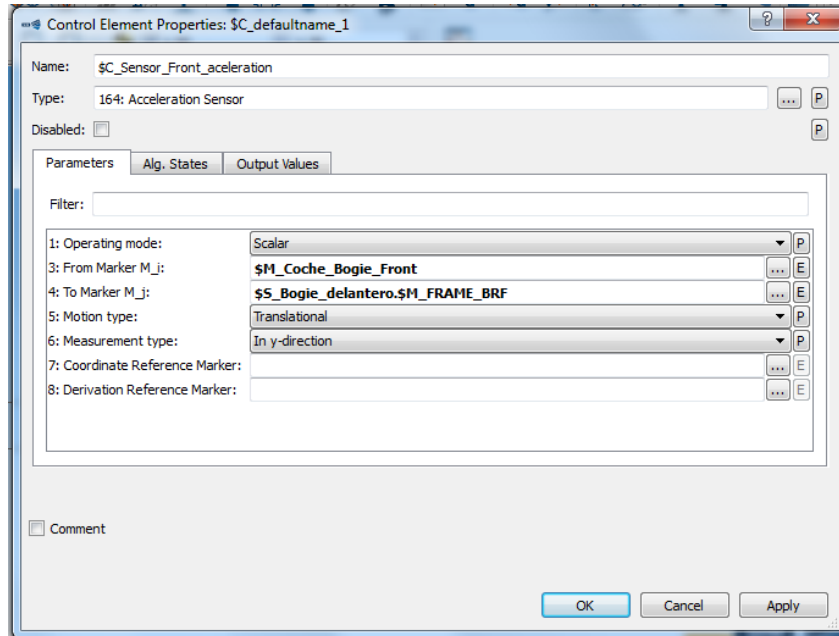


Figura 4.43. Configuración del "Control element" para los sensores de aceleración.

Repitiendo el proceso de forma análoga para el bogie trasero, ya están modelizados todos los sensores necesarios para el funcionamiento del controlador de lógica borrosa.

- **Modelización de los actuadores:** la suspensión activa lateral del vehículo ferroviario que se estudia en este documento, cuenta con dos actuadores por bogie, dichos actuadores son controlados mediante el algoritmo de lógica borrosa (señal de salida del controlador).

Por esta razón, para la modelización de los actuadores en el software, es necesario previamente, importar a Simpack el archivo ".dll" creado mediante Simulink, y que contiene el algoritmo de lógica borrosa junto a la información sobre el controlador de la suspensión activa con sus entradas, salidas y demás componentes.

La creación de dicho archivo ".dll", se detalla paso a paso en el siguiente capítulo 5, en el punto 5.3, junto a las pautas seguidas para el desarrollo del algoritmo de lógica borrosa y del controlador. Llegados a este punto, si no se dispone de dicho archivo ".dll", se debe proceder a su creación antes de proseguir con el modelado de la suspensión activa.

Es muy importante que la ubicación del archivo ".dll" en cuestión sea la adecuada, ya que de lo contrario Simpack no podrá leerlo. Dicha ubicación ha de ser Database\ mbs_db_matsim\Carpeta con el nombre del archivo .dll\win64\archivo.dll, situándose la carpeta "Database" dentro de la carpeta anteriormente creada "subestructuras" junto al archivo ".spck" del modelo en Simpack.

No se debe olvidar actualizar nuevamente el “Search Path” de Simpack nada más volver a abrir el programa, para que éste sea capaz de localizar el nuevo archivo “.dll”.

La importación del archivo “.dll” a Simpack se realiza mediante la creación de un “Control Element”. Como se hizo para la creación de los sensores, se hace “click” en Edit\Create\Control Element... y se crea un nuevo elemento con el nombre de “\$C_Control”.

En esta ocasión, en la ventana de propiedades, se selecciona en la opción “Type” el modelo “233: MatSIM”. A continuación, se importa el archivo “.dll” (en este caso con el nombre “Algoritmo.dll”) seleccionándolo en el apartado “1: MatSIM model name”, y se especifican el resto de opciones que se muestran en la figura 4.44, entre las que se encuentran las selección de los sensores tanto de posición como de aceleración creados anteriormente.

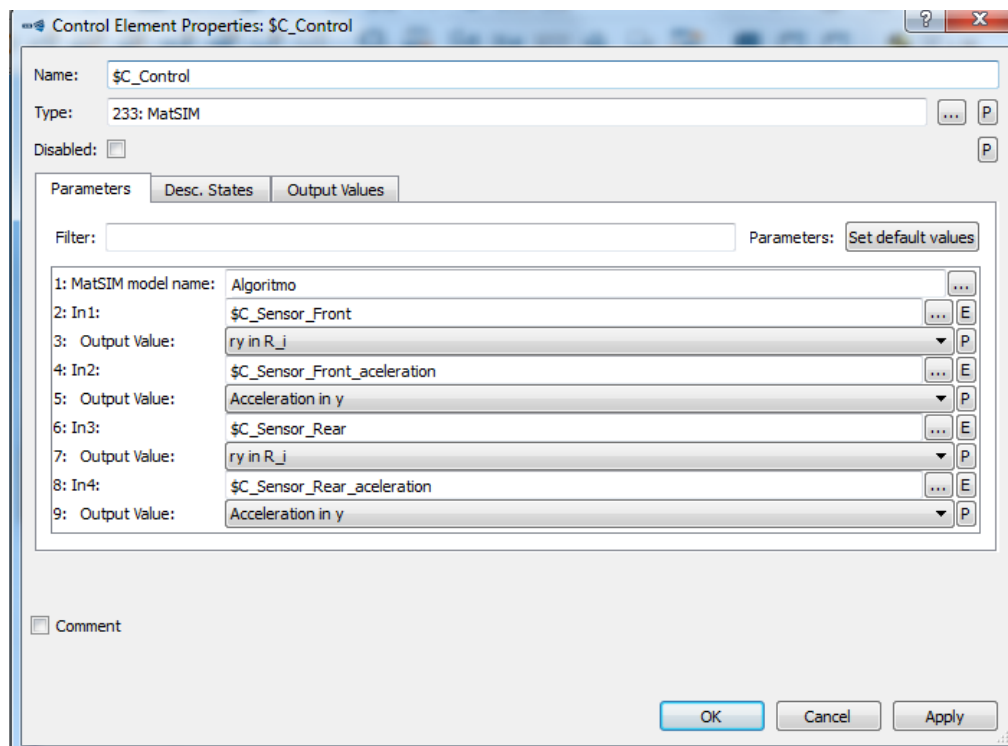


Figura 4.44. Configuración del "Control element" referido al controlador de lógica difusa.

Nótese que en la figura 4.44 los apartados “In 1” y “In 2” corresponden con las entradas del controlador referido al bogie delantero, mientras que los apartados “In 3” y “In 4”, corresponden con las entradas del controlador del bogie trasero.

Una vez creado el “Element Control”, que contiene el algoritmo de lógica borrosa y modelo del controlador que se utiliza, se procede a crear dos expresiones (“Expressions”), una para cada controlador, que toman la señal de salida del elemento de control que se acaba de crear, y dictan el comportamiento de los actuadores correspondientes.

Para la creación de las expresiones se hace “click” en Edit\Create\Expression... y se crean dos expresiones con los nombres “\$X_Force_Lat_Front” y \$X_Force_Lat_Rear, correspondientes con las expresiones del controlador delantero y del controlador trasero correspondientemente. Una vez creada una expresión, se accede a su ventana de propiedades, y en el apartado “definition” se escribe el código “FORCEOV(\$C_Control,1)” para el controlador del bogie delantero, y “FORCEOV(\$C_Control,2)”, para el controlador del bogie trasero, tal y como se muestra en la figura 4.45.

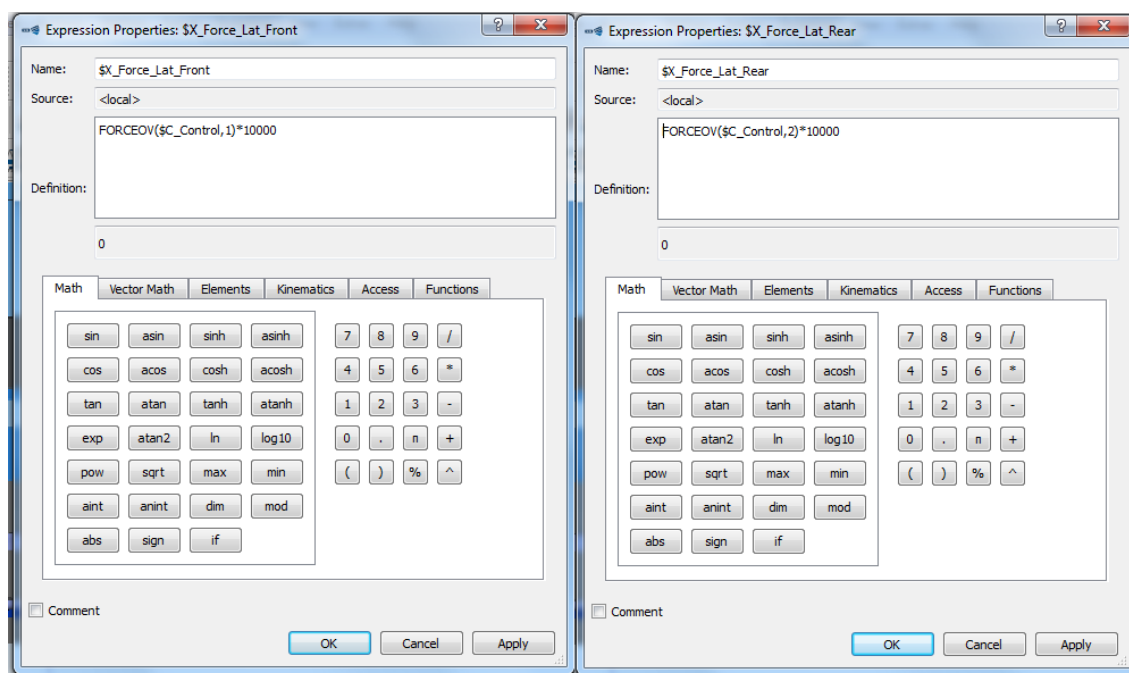


Figura 4.45. Configuración de las "Expressions".

Dicho código, escrito en el apartado “Definition” de cada expresión, realiza la función de recoger la señal de salida ya sea del controlador 1, o del controlador 2, (“FORCEOV(\$C_Control,1)” y “FORCEOV(\$C_Control,2)” respectivamente), que como se explica en el capítulo 5, está acotada entre los valores -1 y +1. Así pues, dicha señal ha de ser ampliada para que los actuadores ejerzan una fuerza lo suficientemente grande, ya que estos ejercen su fuerza en función del valor que les proporciona la “Expression” asociada a ellos. Es por ello, que en la figura 4.46, a cada código que representa la señal de salida de cada controlador se le multiplica por 10.000, para ampliar la fuerza que ejerce el actuador.

Dicho valor de 10.000 ha sido obtenido mediante la realización de diversas simulaciones en Simpack, con valores distintos de ampliación de la señal de salida del controlador, siendo este valor del 10.000, el que mejores resultados ha proporcionado.

Una vez creadas las expresiones del controlador delantero y del controlador trasero correctamente, simplemente queda crear los cuatro actuadores del vehículo y asociarles su expresión correspondiente.

Así pues haciendo “click” en Edit\Create\Force Element... se deben crear cuatro elementos con los nombres “\$F_MDamp_Lat_FR”, “\$F_MDamp_Lat_FL”, “\$F_MDamp_Lat_RR” y “\$F_MDamp_Lat_RL”, siendo dos de ellos los actuadores del bogie delantero, y los otros dos restantes los del bogie trasero. A continuación, en la ventana de propiedades de cada elemento, se indica el tipo de elemento “51: Force Expresion Ptp”, se establecen los marcadores entre los cuales va situado cada actuador, y se indica la expresión asociada al actuador, “\$X_Force_Lat_Front” si se trata de un actuador situado en el bogie delantero, y \$X_Force_Lat_Rear si se trata de un actuador situado en el bogie trasero, tal y como se muestra en la figura 4.46.

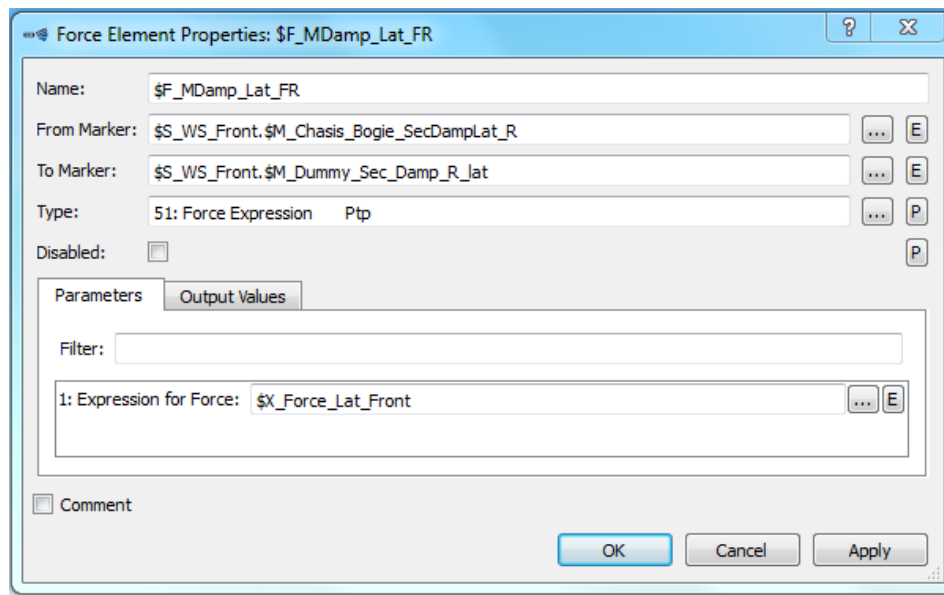


Figura 4.46. Configuración de los actuadores.

Alcanzado este punto, la suspensión lateral activa estaría completamente modelizada y lista para simularse en cualquier momento.

Capítulo 5. Controlador de lógica difusa

A continuación, en este quinto capítulo, se muestran las pautas a seguir para el proceso de creación del controlador basado en lógica difusa mediante Matlab y su herramienta Simulink.

Además, se indica el proceso a seguir para implementar el controlador desarrollado en Matlab, en el modelo del vehículo ferroviario creado en Simpack y cuyo proceso de modelado se detalla en el anterior capítulo, así como los diversos modelos de controladores desarrollados antes de la elección final del controlador de lógica difusa definitivo.

5.1 Introducción

Una vez explicado en el anterior punto 3.1.2, el funcionamiento básico de un algoritmo de lógica borrosa de forma general, en este quinto capítulo, se muestra el proceso específico llevado a cabo para el desarrollo del algoritmo de lógica borrosa en el cual, se basa el controlador de la suspensión activa del vehículo ferroviario. El software utilizado para tal fin ha sido Matlab, y su herramienta Simulink.

Simulink permite modelar sistemas dinámicos complejos mediante diagramas de bloques, dentro de los cuales, se pueden modelar bloques basados en algoritmos de lógica borrosa. Matlab por su parte, es un software tremendamente extendido en áreas tanto de ingeniería, como de matemáticas, física, o telecomunicaciones. Algunas de sus propiedades más importantes que presenta este software son, la facilidad que ofrece para analizar y visualizar datos, el desarrollo de algoritmos y aplicaciones, y realizar cálculos numéricos con matrices entre otros muchos.

A continuación, en los siguientes puntos de este capítulo quinto, se describe el proceso para desarrollar tanto el controlador, como el algoritmo de lógica difusa mediante Simulink y Matlab respectivamente, así como los distintos modelos de controladores que también fueron desarrollados y simulados, pero que finalmente se desecharon.

5.2 Desarrollo del algoritmo de lógica borrosa mediante Matlab

El controlador de la suspensión lateral del vehículo ferroviario con el que se han realizado las simulaciones en SimPack se basa en un algoritmo de lógica borrosa, cuyas dos entradas son la posición relativa entre el bogie y el coche, y la aceleración del coche. Además, sus variables lingüísticas tanto de entrada como de salida están basadas en funciones gaussianas y no lineales. La elección de este tipo de modelo de algoritmo con dichas características y entradas se ha realizado tras un proceso de comparación entre distintos modelos que se detalla con más profundidad en el punto 5.2 de este capítulo [19].

Una vez establecidas las bases anteriores del algoritmo de lógica borrosa, se puede proceder a la creación del algoritmo de lógica borrosa, junto a sus respectivas variables lingüísticas de entrada y de salida, así como de sus reglas básicas correspondientes que definen el comportamiento del controlador final.

Para comenzar con la creación del algoritmo de lógica borrosa se comienza acudiendo a la interfaz principal de Matlab y tecleando el comando “fuzzy”, tras lo cual debe aparecer en pantalla una ventana para la creación del algoritmo.

En dicha ventana, haciendo “click” en Edit\Add Variable... se pueden introducir todas las entradas (Inputs) o salidas (Outputs) con las que trabaja el algoritmo de lógica borrosa (figura 5.1).

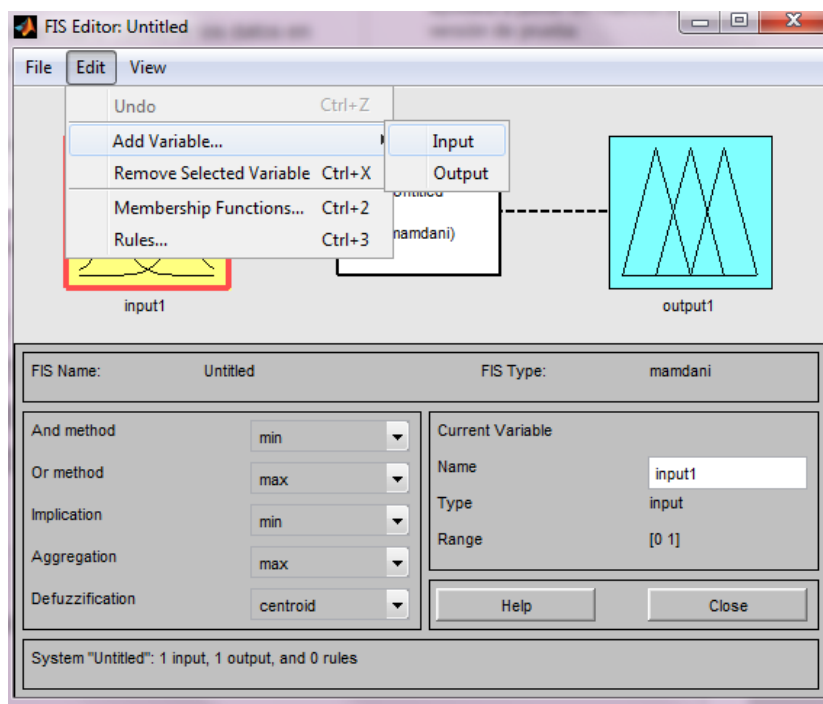


Figura 5.1. Ventana para añadir entradas y salidas al algoritmo de lógica borrosa en Matlab.

Como se ha comentado anteriormente, el algoritmo con el que se está trabajando consta de dos entradas (posición relativa y aceleración) y de una única salida (fuerza ejercida por los actuadores).

Así pues, se define en la ventana anterior de la figura 5.1, dos entradas y una única salida, tal y como se muestra en las figuras 5.2, 5.3, y 5.4 respectivamente. Cabe mencionar que, para conseguir un algoritmo más sencillo, tanto las entradas como la salida, solo tendrán valores de entre -1 y 1 [18]. Posteriormente, mediante Simulink se pueden amplificar o disminuir las entradas y salidas del algoritmo de manera sencilla.

➤ Entradas:

- **Posición relativa:** se establecen cinco variables lingüísticas basadas en funciones gaussianas que definen la desalineación del punto medio del

bogie con respecto al punto medio del coche (Figura 4.41: Alineación lateral del bogie con respecto al coche). La variable “Z” indica la desalineación óptima (distancia admisible entre los centros del bogie y del coche), la variable “Znb” indica la desalineación máxima negativa entre bogie y coche, y la variable “Zpb” indica la distancia máxima positiva entre bogie y coche. Las variables “Zns” y “Zps” son estados intermedios entre las variables anteriormente definidas.

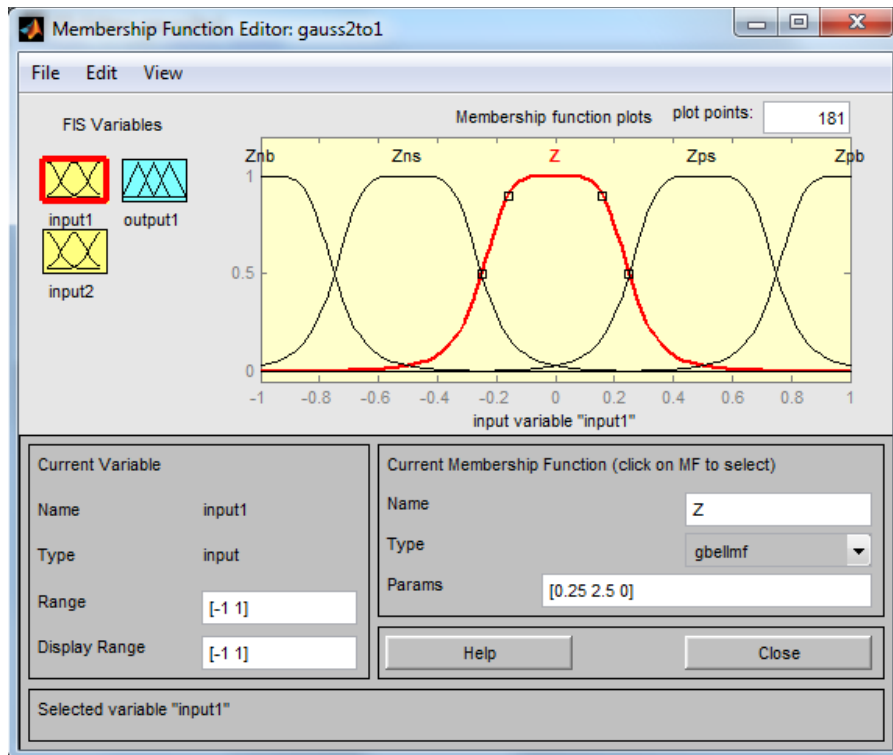


Figura 5.2. Entrada 1 del algoritmo de lógica borrosa.

- **Aceleración:** se establecen tres variables basadas en funciones gaussianas que indican la aceleración lateral que sufren en cada instante el coche. La variable lingüística “A” representa la aceleración “nula” o admisible, la variable “An” la aceleración negativa máxima, y la variable “Ap”, la aceleración positiva máxima.

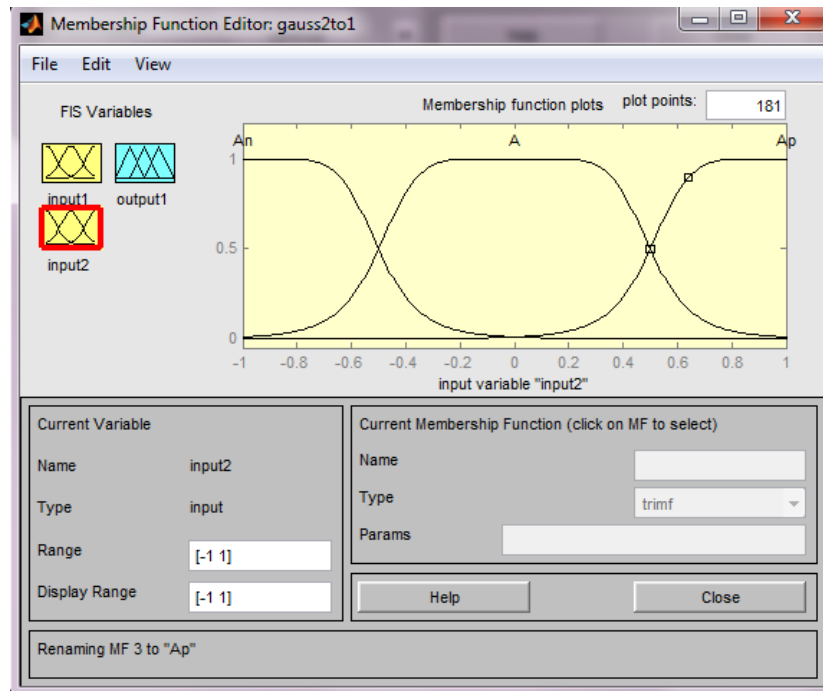


Figura 5.3. Entrada 2 del algoritmo de lógica borrosa.

- **Salida:** se establecen cinco variables lingüísticas basadas en funciones gaussianas que definen la fuerza a ejercer por parte del actuador. La variable "U" indica la fuerza nula por parte del actuador, la variable "Unb" indica la máxima fuerza negativa que el actuador es capaz de desarrollar, y la variable "Upb" indica la máxima fuerza positiva que el actuador es capaz de desarrollar. Las variables "Uns" y "Upb" son estados intermedios entre las variables anteriormente definidas.

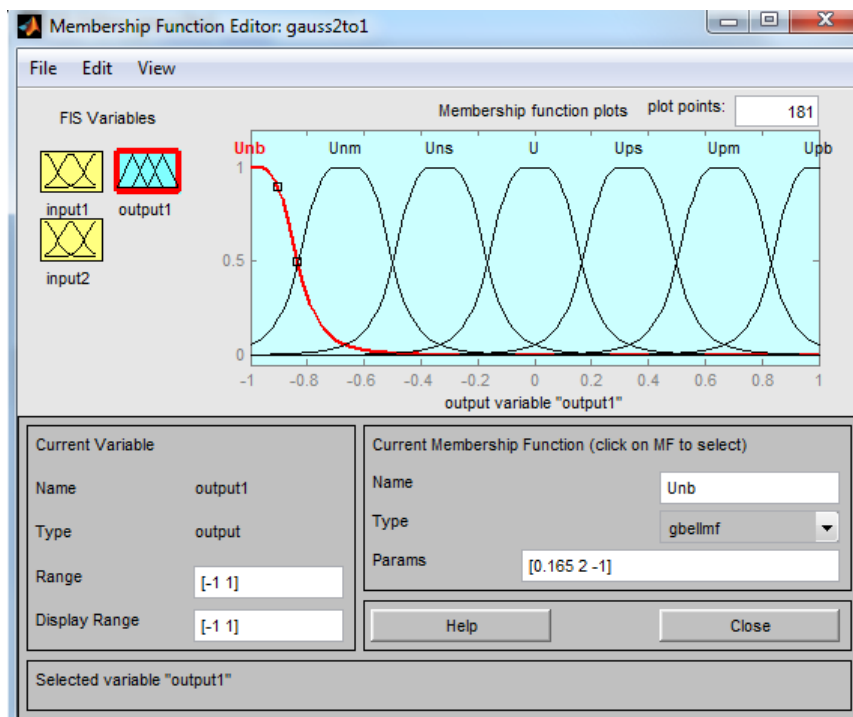


Figura 5.4. Salida del algoritmo de lógica borrosa.

Una vez definidas las entradas y salidas del algoritmo, se establecen las reglas básicas de funcionamiento del mismo, para ello, tal y como se muestra en la figura 5.5 se accede a la ventana donde se establecen las reglas básicas en Matlab haciendo “click” en la pestaña “Edit” seguido de “Rules...”

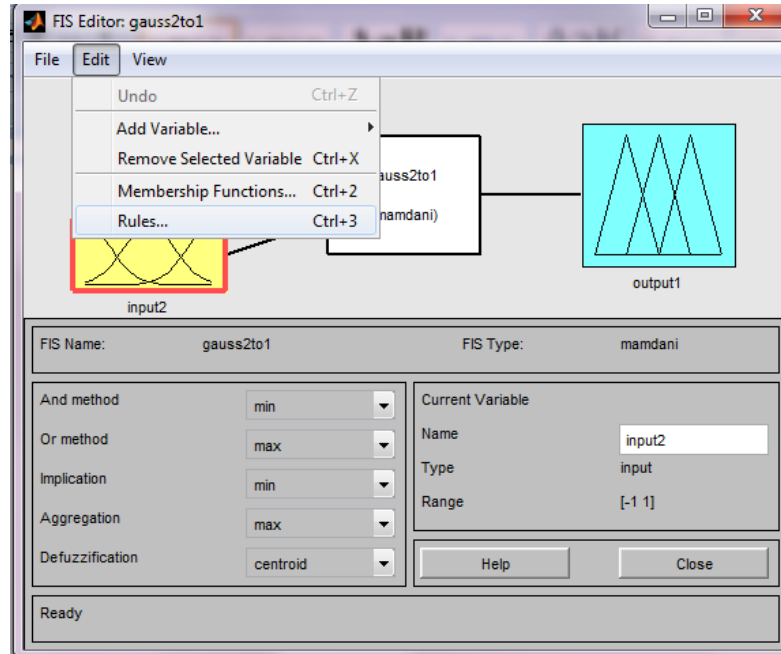


Figura 5.5. Ventana para añadir reglas básicas al algoritmo de lógica borrosa en Matlab.

El algoritmo de lógica borrosa en el que esta basado el controlador, como se ha comentado anteriormente, consta de dos entradas, una de ellas posee cinco variables lingüísticas, y la otra de tres. Por lo tanto, el número total de reglas básicas necesarias para regir el comportamiento del controlador es de quince.

Para cada combinación de las variables de entrada se le debe asignar una variable de salida, de forma análoga a lo explicado en el ejemplo del punto 3.1.2 de este documento, pero teniendo en cuenta que, en este caso, se disponen de dos entradas en vez de una [13].

Tabla 5.1. Reglas básicas del algoritmo de lógica borrosa.

Reglas básicas	Posición relativa	Aceleración	Fuerza del actuador
Regla 1	Znb	An	Unb
Regla 2	Zns	An	Unm
Regla 3	Z	An	Uns
Regla 4	Zps	An	U
Regla 5	Zpb	An	Ups
Regla 6	Znb	A	Unm
Regla 7	Zns	A	Uns
Regla 8	Z	A	U
Regla 9	Zps	A	Ups

Regla 10	Zpb	A	Upm
Regla 11	Znb	Ap	Uns
Regla 12	Zns	Ap	U
Regla 13	Z	Ap	Ups
Regla 14	Zps	Ap	Upm
Regla 15	Zpb	Ap	Upb

Las reglas básicas elegidas para el comportamiento del controlador son las mostradas en la tabla 5.1, y su visualización en pantalla una vez introducidas en Matlab se muestra en la figura 5.6.

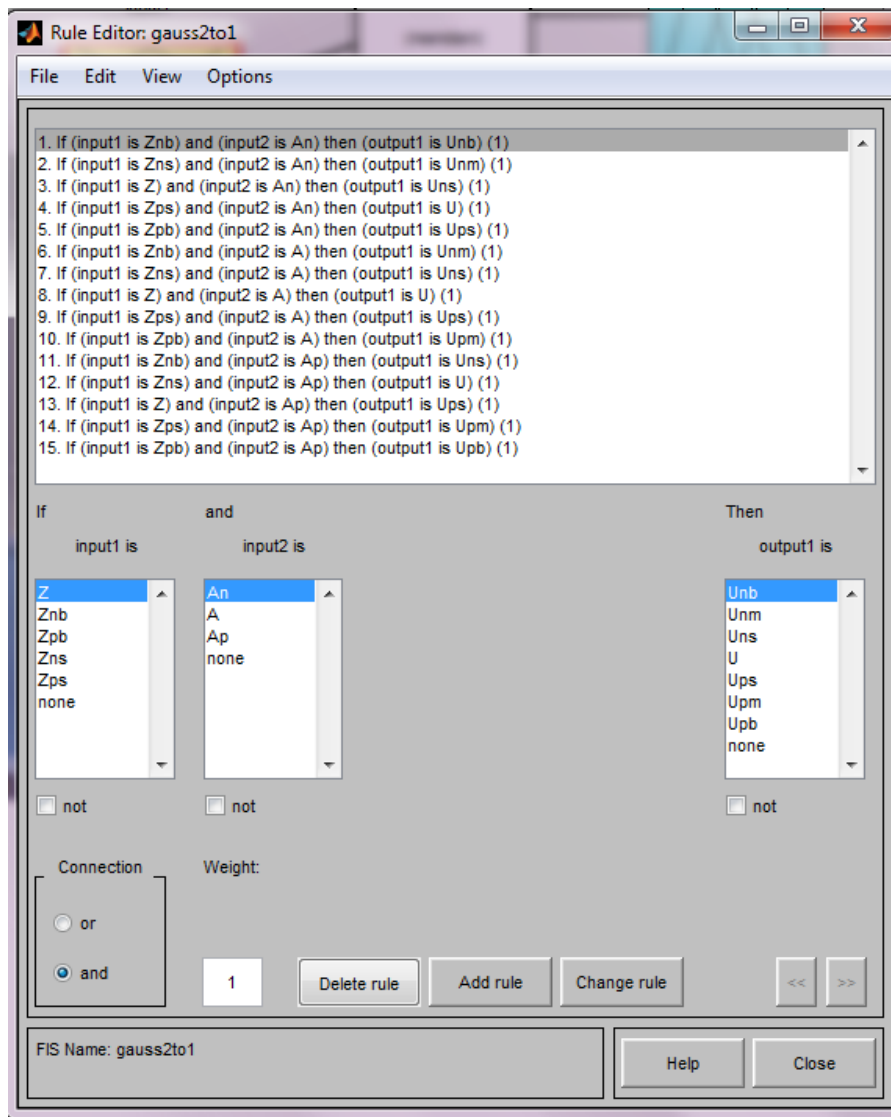


Figura 5.6. Conjunto de reglas básicas del algoritmo de lógica borrosa.

Una vez establecidas todas las reglas básicas en Matlab, únicamente queda crear el archivo ".fis" que contiene los datos del algoritmo de lógica borrosa en una carpeta cualquiera, dicho archivo es necesario para la posterior configuración del controlador en Simulink en el punto 5.3. Para crear el archivo

“.fis” se hace “click” en la pestaña “File” seguidamente de “Export/ To File...” (figura 5.7).

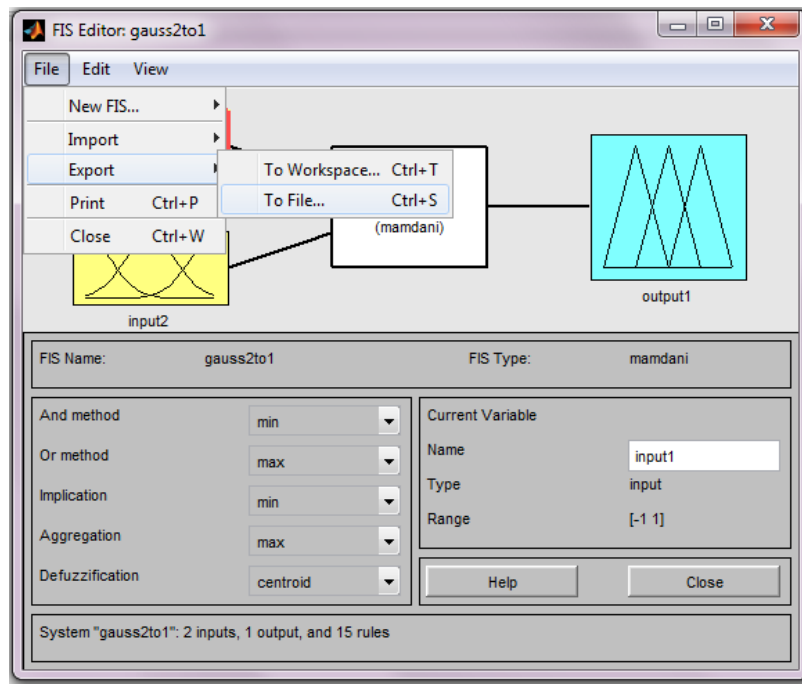


Figura 5.7. Ventana para la creación del archivo ".fis".

5.2 Modelo de algoritmo utilizado y alternativas

En el proceso de desarrollo de un algoritmo de lógica borrosa para el controlador de la suspensión lateral de un vehículo ferroviario, es bastante usual probar distintos modelos hasta dar con uno que se adapta de manera óptima a las especificaciones requeridas, en este caso, al tratarse de la suspensión lateral, se intentó realizar un controlador que disminuyese al mínimo la desalineación lateral entre el bogie y el coche.

Para la elección del controlador más adecuado, se trabaja, principalmente con dos modelos distintos, cuya diferencia fundamental radica en el tipo de entradas del algoritmo de lógica borrosa. En un caso, posición y velocidad, y en el otro caso, posición y aceleración.

A su vez, cada uno de estos dos modelos puede dividirse en otros dos submodelos. En función de que las funciones elegidas para designar las variables lingüísticas tanto de entrada como de salida, fueran funciones de tipo gaussianas (figura 5.8) o por funciones de tipo lineal (figura 5.9).

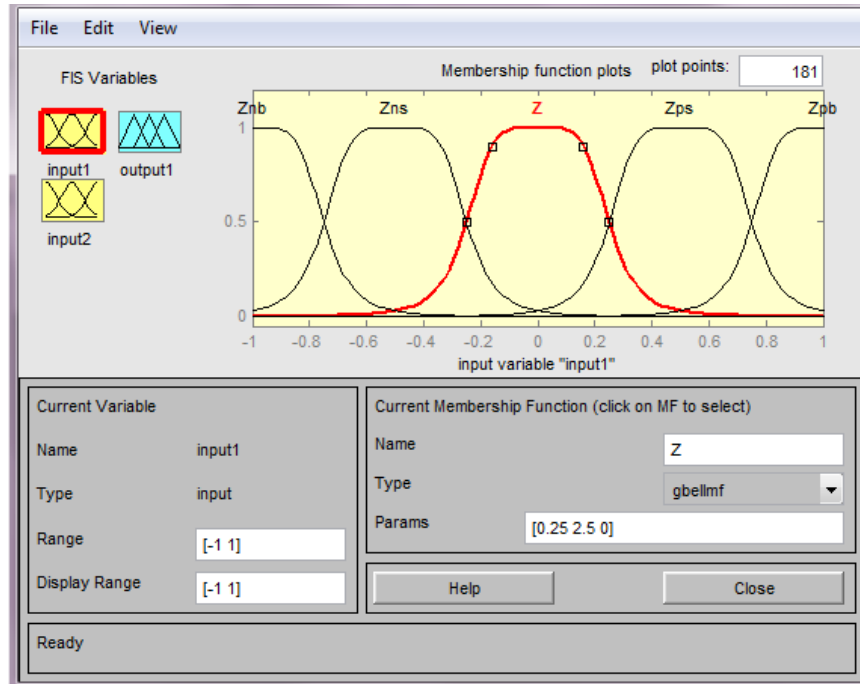


Figura 5.8. Entrada mediante funciones gaussianas.

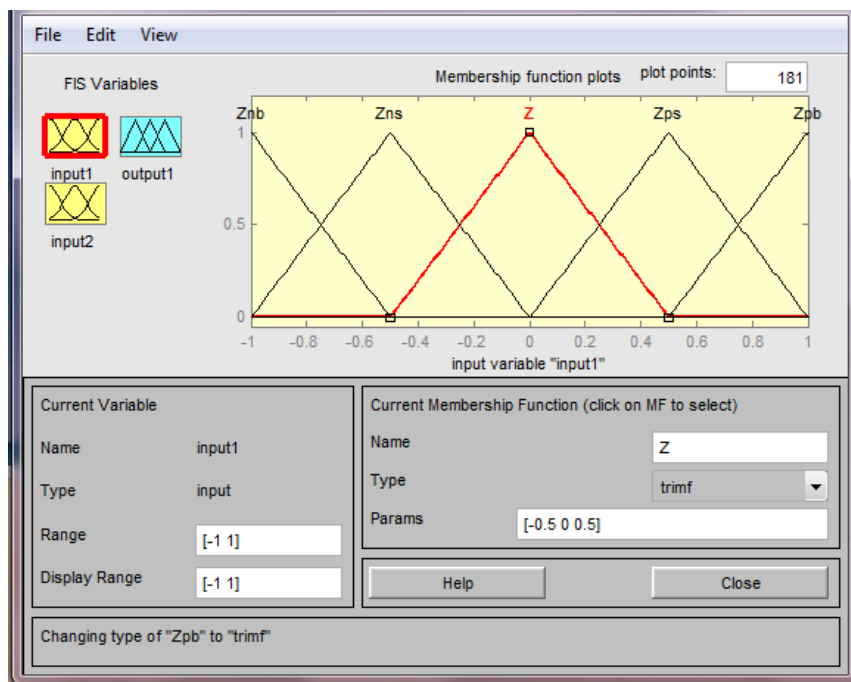


Figura 5.9. Entrada mediante funciones lineales.

De esta forma, se simulan y desarrollan un total de hasta cuatro modelos distintos de controladores, obteniendo finalmente los mejores resultados con la simulación del controlador cuyas entradas son la posición y la aceleración y, tanto, sus variables lingüísticas de entrada como de salida se basan en funciones gaussianas.

5.3 Configuración del controlador en Simulink

Una vez se tiene desarrollado el algoritmo de lógica borrosa y se ha implementado en Matlab obteniéndose el archivo “.fis” con los datos del algoritmo (apartado 5.1). Se puede proceder a configurar el controlador que se utiliza para las simulaciones mediante Simpack.

Se comienza creando un nuevo modelo de Simulink dentro de la interfaz de Matlab, tal y como se muestra en la figura 5.10.

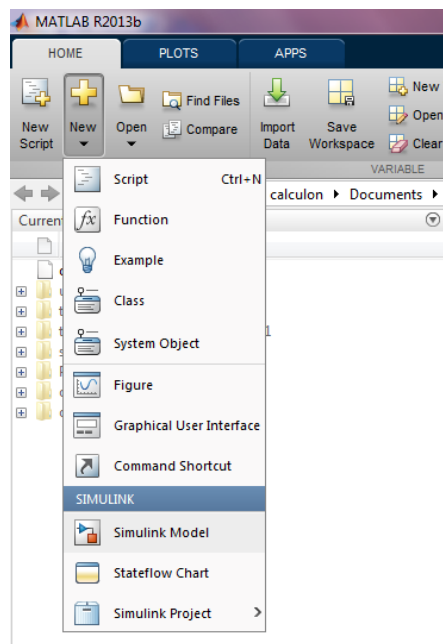


Figura 5.10. Inicialización de Simulink dentro de Matlab.

Una vez efectuado este paso, se accede a la ventana principal del nuevo modelo de Simulink (figura 5.11). En dicha ventana, se van introduciendo los bloques por los cuales está formado el controlador. Se ha de tener en cuenta que el vehículo ferroviario que se ha de simular consta de dos bogies y, por lo tanto, se han de configurar dos controladores dentro del mismo modelo de Simulink, uno para el bogie delantero, y otro para el trasero.

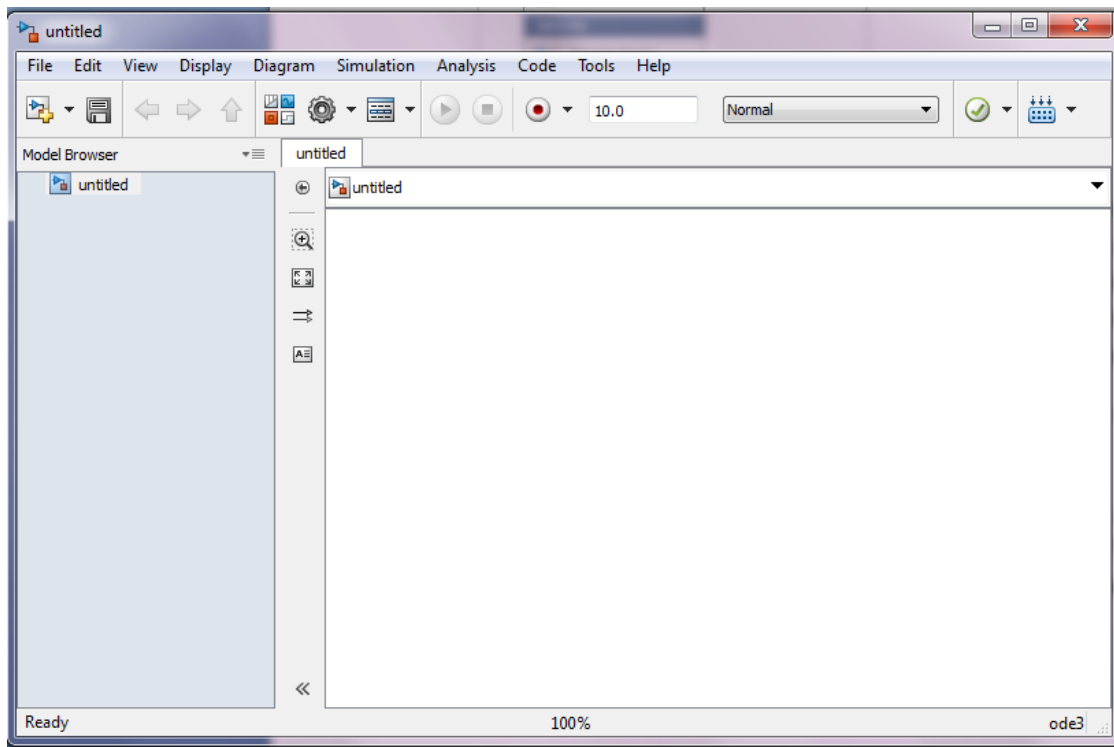


Figura 5.11. Ventana principal de Simulink.

Los bloques necesarios para la configuración del controlador mediante Simulink se detallan a continuación:

- **Bloque “In” (figura 5.12):** se trata de un bloque básico en el controlador, su función es emitir la señal que recibe de los distintos sensores disponibles. Cada bloque “In” representa una entrada al controlador. Se deben colocar tantos bloques como de entradas se dispongan [14].

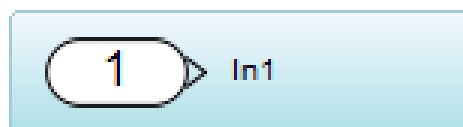


Figura 5.12. Icono bloque “In”.

- **Bloque “Gain” (figura 5.13):** tienen una doble función, por una parte multiplican la señal que les llega por una constante (ganancia) que se ha de especificar. Y por otra parte, es capaz de limitar el rango de su señal de salida entre dos valores determinados también configurables. Tanto la señal de entrada, como la ganancia o los valores límites del rango pueden ser valores escalares, vectoriales, o matriciales [15].

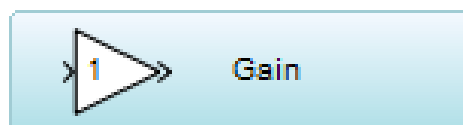


Figura 5.13. Icono bloque “Gain”.

- **Bloque “Fuzzy” (figura 5.14):** se trata del bloque principal del controlador, contiene el algoritmo de lógica borrosa, y por lo tanto, es el lugar donde se procesan las señales de entrada y se determinan las señales salida en función de las reglas básicas establecidas en el algoritmo de lógica borrosa. Para que este bloque se active, se debe de cargar en él, previamente, el archivo “.fis” creado en el punto 5.1 y que contiene la información básica del algoritmo de lo lógica borrosa en el que se basa el controlador [15].



Figura 5.14. Icono bloque "Fuzzy".

- **Bloque “Mux” (figura 5.15):** su principal tarea es combinar las dos señales de entrada que llegan a este bloque en una única señal de salida. Tanto las señales de entrada como la señal de salida pueden ser escalares, vectores o matrices. Por defecto, este tipo de bloque cuenta con dos entradas y una salida, pero dicha configuración puede ser modificada fácilmente, aunque para el controlador que se está desarrollando no es necesario [15].

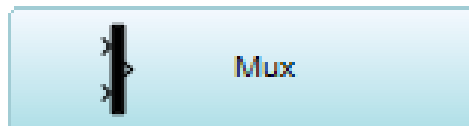


Figura 5.15. Icono bloque "Mux"

- **Bloque “Out” (figura 5.16):** es un bloque análogo al anteriormente descrito bloque “In”. Cada bloque “out” representa una salida del controlador, se deben colocar tantos bloques como salidas se dispongan [15].

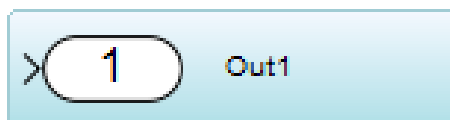


Figura 5.16. Icono bloque "Out".

Una vez descritos los bloques que se utilizan en Simulink para el desarrollo del controlador, se procede a introducirlos en la ventana anterior de la figura 5.11 haciendo “click” en la pestaña “View” y a continuación en la opción “Library Browser”. Tras ello, aparece una librería en la que se puede ir escogiendo e introduciendo en el modelo de Simulink cada uno de los bloques necesarios, para, posteriormente, poder conectar unos bloques con otros de manera sencilla, haciendo “click” sobre la salida de un bloque y arrastrando hasta la entrada del siguiente bloque, o viceversa.

Tras introducir todos los bloques necesarios y conectarlos entre sí, el modelo de Simulink desarrollado es el que se muestra en la figura 5.12, y es el modelo de controlador utilizado para la simulación en Simpack [13].

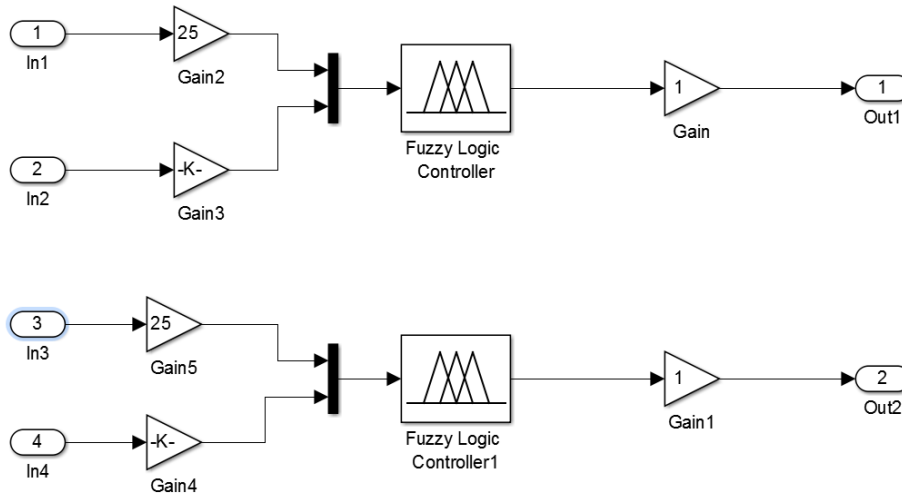


Figura 5.17. Modelo de Simulink.

Como se puede observar en la figura 5.12, el controlador cuenta con dos salidas, una para el bogie delantero (Out 1) y otra para el bogie trasero (Out 2).

Finalmente, únicamente faltan por configurar los bloques “Gain” y “Fuzzy”. Los bloques “Fuzzy” deben contener el archivo “.fis” creado anteriormente. Para ello se efectúa doble “click” sobre cada bloque y se selecciona el archivo “.fis” (figura 5.13).

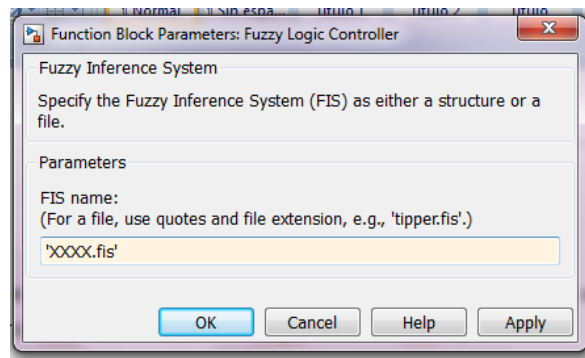


Figura 5.18. Ventana para importar el archivo “.fis”.

En cuanto a los bloques “Gain”, estos han de tener su señal de salida acotada entre los valores -1 y 1, para lo cual se hace doble “click” en el bloque “Gain” y pinchando en la pestaña “Signal Attributes”, se establecen los límites de la señal de salida (figura 5.14) [18].

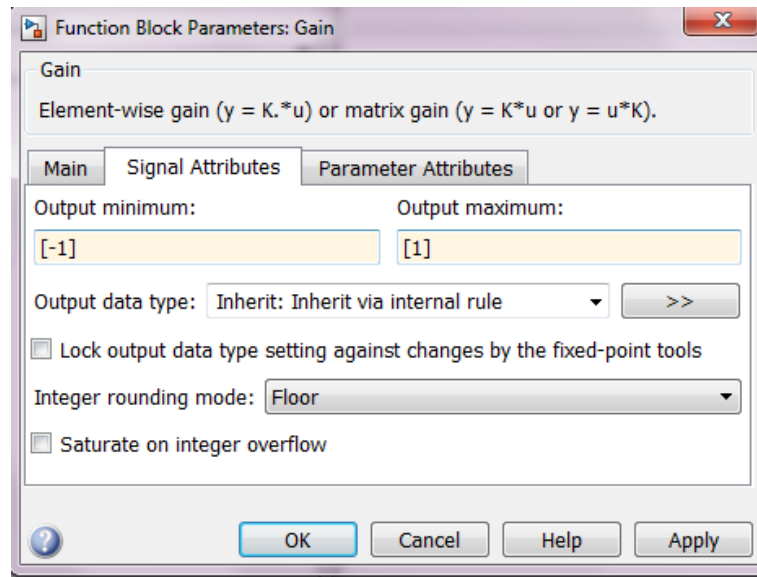


Figura 5.19. Configuración bloque "Gain".

En cuanto a la ganancia de los bloques "Gain", se ha de diferenciar entre los bloques colocados a la entrada del bloque "Fuzzy" y los situados a la salida. Estos últimos, se han colocado como filtros para la señal de salida y su ganancia es 1, su única misión además de garantizar que la señal de salida del controlador esté entre -1 y 1, es permitir modificar de manera rápida y fácil la respuesta de los actuadores. Sin embargo, en este diseño de controlador ha de permanecer siempre con ganancias de valor 1, puesto que la respuesta de los controladores se puede controlar también desde Simpack de manera más sencilla todavía (tal y como se mostró en el apartado 4.3.5).

La determinación de la ganancia de los bloques "Gain" previos al bloque "Fuzzy" resulta más compleja. La forma en la que se ha establecido los valores de ganancia para dichos bloques ha sido en función de los resultados obtenidos de simular en Simpack el vehículo ferroviario carente de suspensión activa y provisto de una suspensión convencional.

En la gráfica de la figura 5.17 se muestra la variación de la posición relativa entre el bogie y el coche en el eje Y, atravesando un tramo recto con una gran oscilación de la vía sinusoidal de 0,02 m de amplitud. Para la creación de dicha oscilación, se ha de modificar el elemento "Track" creado en el punto 4.3.2 en Simpack.

La modificación del "Track" comienza creándose una excitación haciendo "click" derecho sobre el modelo a simular y seleccionando "Creat/Excitations..." (figura 5.15).

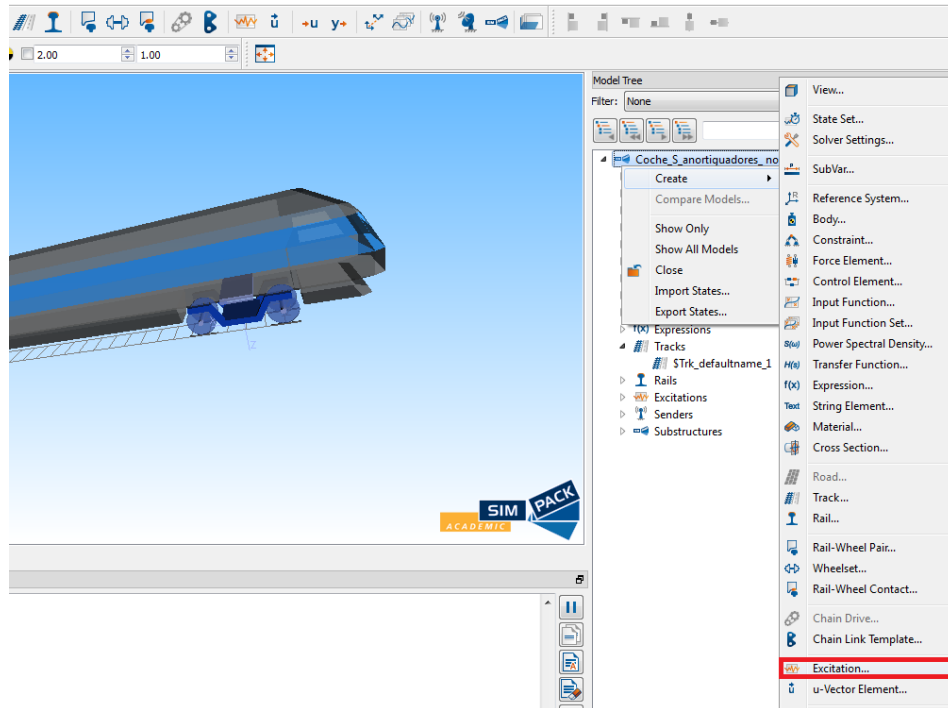


Figura 5.20. Creación de una nueva excitación.

A continuación se denomina a la nueva excitación “\$E_senoidal” y se introduce las propiedades tal y como se muestra en la figura 5.16, donde el valor de 0,02 m corresponde a la amplitud de la oscilación, y el valor de 0,1 rad/m corresponde con la frecuencia medida en distancia angular de las oscilaciones.

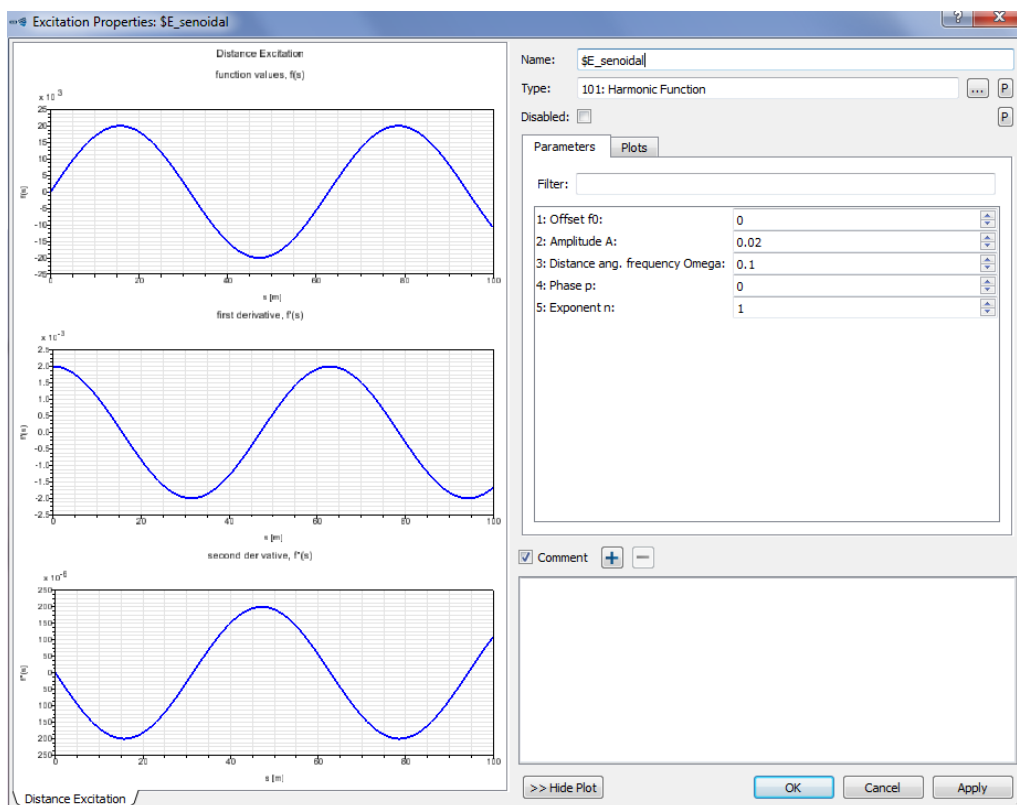


Figura 5.21. Configuración de la excitación.

Una vez creada la anterior excitación, ya se puede modificar el “Track” del modelo introduciendo dentro de la pestaña “Excitation”, en la opción “Excitation lateral left” el archivo creado anteriormente “\$E_senoidal”. Tras lo cual, oscilación sinusoidal deseada, de 0,02 m de amplitud, queda implementada en el modelo.

Finalmente, tras realizar una simulación en Simpack del vehículo tal y como se indica en el capítulo 6 de este documento, se obtiene los resultados de la gráfica de la figura 5.22 correspondiente con la variación de la posición relativa del bogie con respecto al coche en el eje Y.



Figura 5.22. Posición relativa del bogie delantero con respecto al coche en el eje Y a lo largo del tiempo, del vehículo provisto de suspensión pasiva.

El valor máximo y el valor mínimo obtenido referido a la posición relativa de la gráfica de la figura 5.17 es de 0.02 m y de -0.018 m respectivamente.

De forma análoga a lo realizado con la posición relativa, se obtienen los resultados de la aceleración lateral que sufre el coche (figura 5.18) cuyos valores máximos y mínimos son de 5.51532 m/s^2 y de -7.9661 m/s^2 .

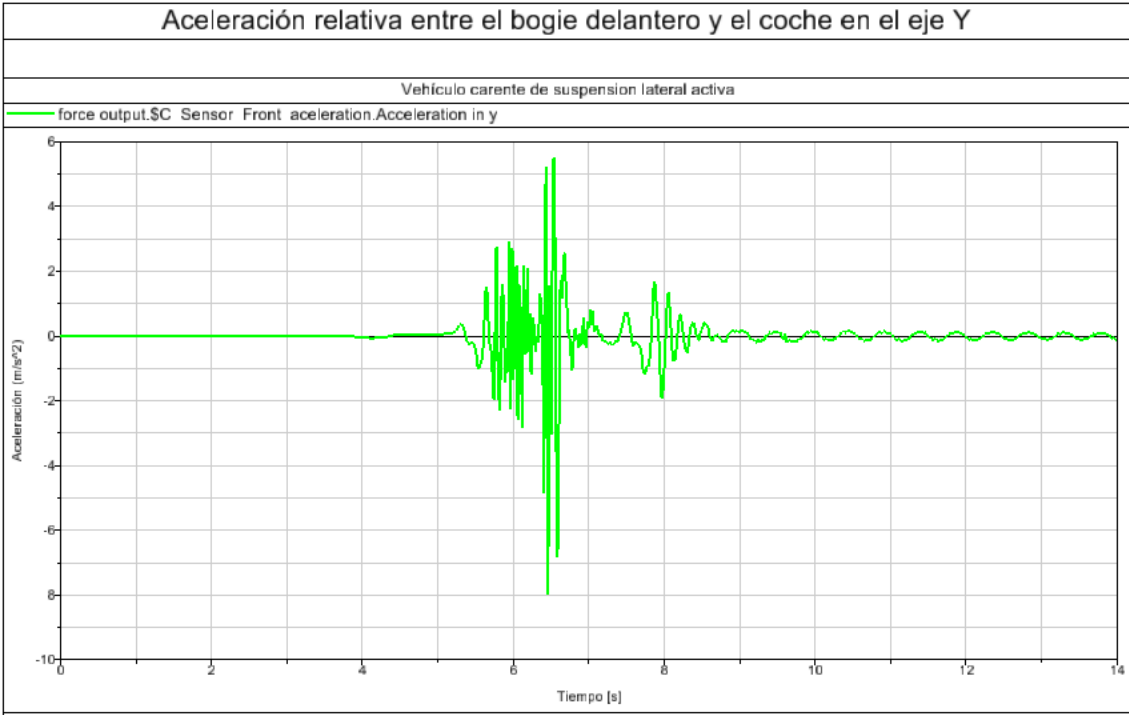


Figura 5.23. Aceleración en el eje Y que sufre el coche provisto de suspensión pasiva en su parte delantera a lo largo del tiempo.

Vistos estos resultados, la ganancia de los bloques “Gain” ha de permitir aprovechar mejor el rango de entre -1 y 1 con el que trabaja el algoritmo de lógica borrosa desarrollado, aumentando el valor de la señal de entrada correspondiente con la posición relativa, y disminuyendo el valor de la aceleración del coche [18].

De esta forma, y buscando siempre trabajar en todo el rango de valores disponibles, se establecieron los valores de ganancia que aparecen en la tabla 5.2 de cada uno de los bloques “Gain” situados antes del bloque “Fuzzy”.

Tabla 5.2. Ganacias Bloques “Gain”.

Bogie:	Bloque “Gain”	Ganancia
Bogie delantero	Gain 2 (posición rel.)	25
	Gain 3 (aceleración)	0.15
Bogie trasero	Gain 5 (posición rel.)	25
	Gain 4 (aceleración)	0.15

Llegados a este punto, el modelo del controlador en Simulink está completado. Únicamente falta por crear el archivo “.dll”, que es el archivo con el que Simpack trabaja en la simulación, proceso que viene descrito en el punto E.5.2 del manual de ayuda de Simpack, y que se detalla a continuación.

Primeramente, antes de crear el archivo “.dll” se han de modificar una serie de parámetros para que el archivo sea compatible con Simpack. Para ello se accede a la ventana de “Configuration Parameters”, haciendo “click” en “Model

Configuration Parameters”, dentro de la ventana principal del modelo de Simulink (figura 5.19).

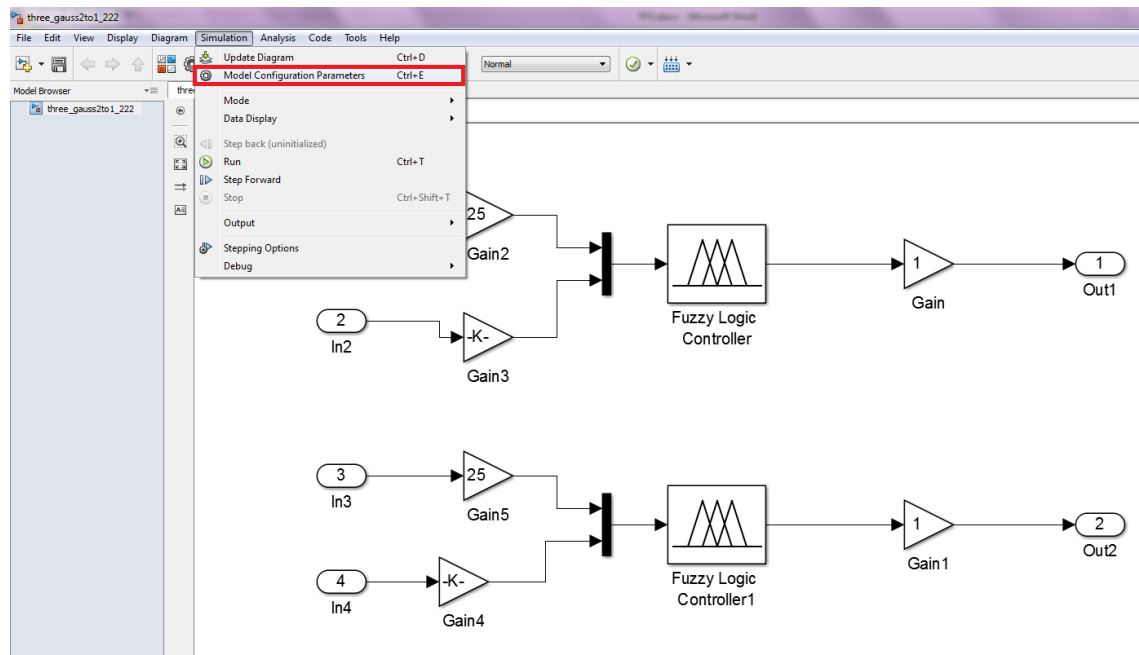


Figura 5.24. Acceso a la configuración de Simulink.

A continuación, en el apartado de “Solver”, se realizan los ajustes indicados en la figura 5.20.

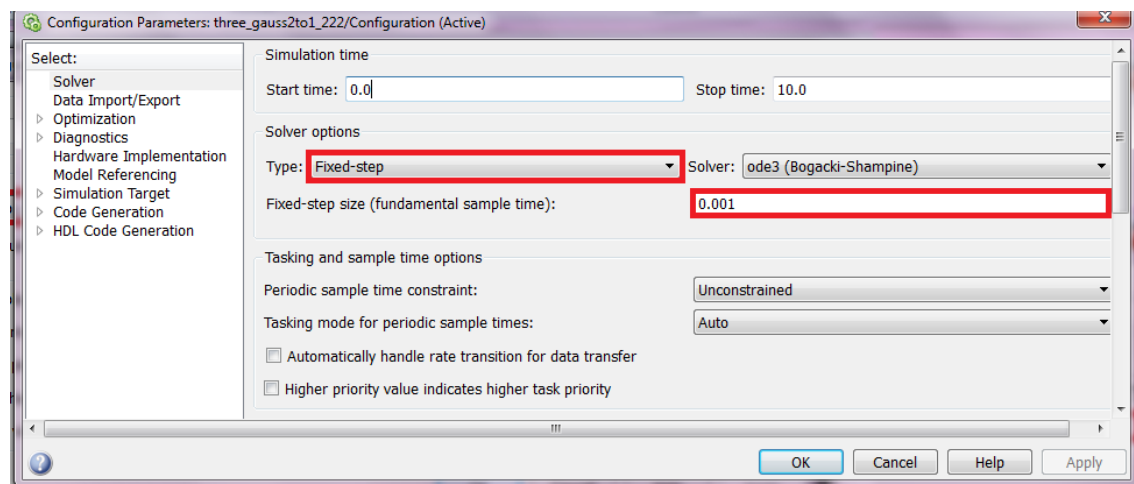


Figura 5.25. Configuración de “Solver” de Simulink .

Seguidamente, se accede al apartado “Signals and Parameters” y se selecciona la opción “Configure...” (Figura 5.21).

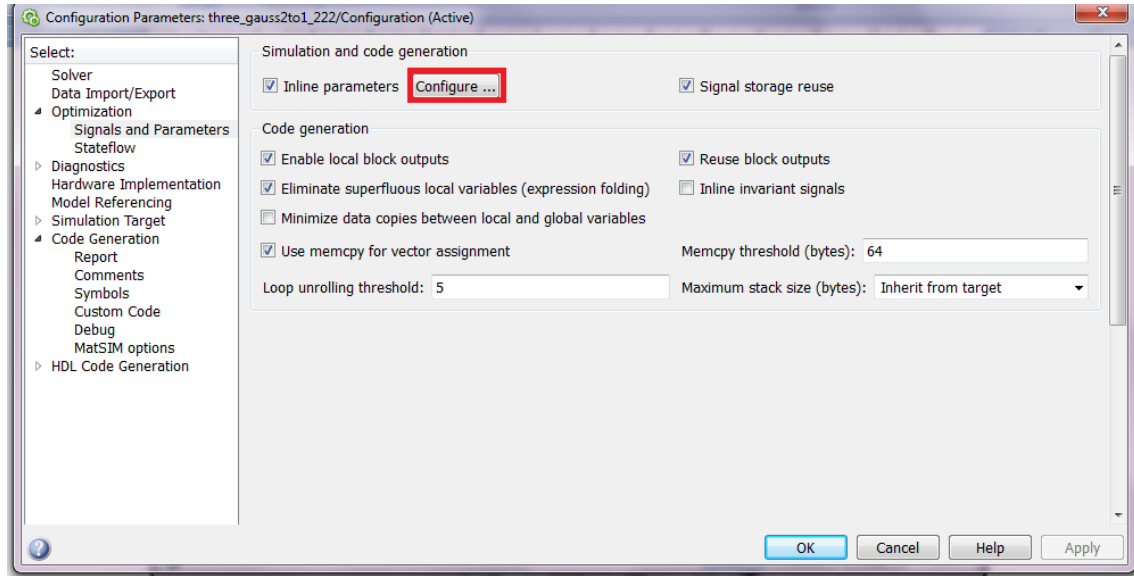


Figura 5.26. Configuración de “Signals and Parameters” de Simulink.

Tras lo cual, aparece una ventana que contiene todos los bloques “Gain” disponibles, los cuales tendrán que ser añadidos al cuadro “Global (turnable) parameters” (Figura 5.22).

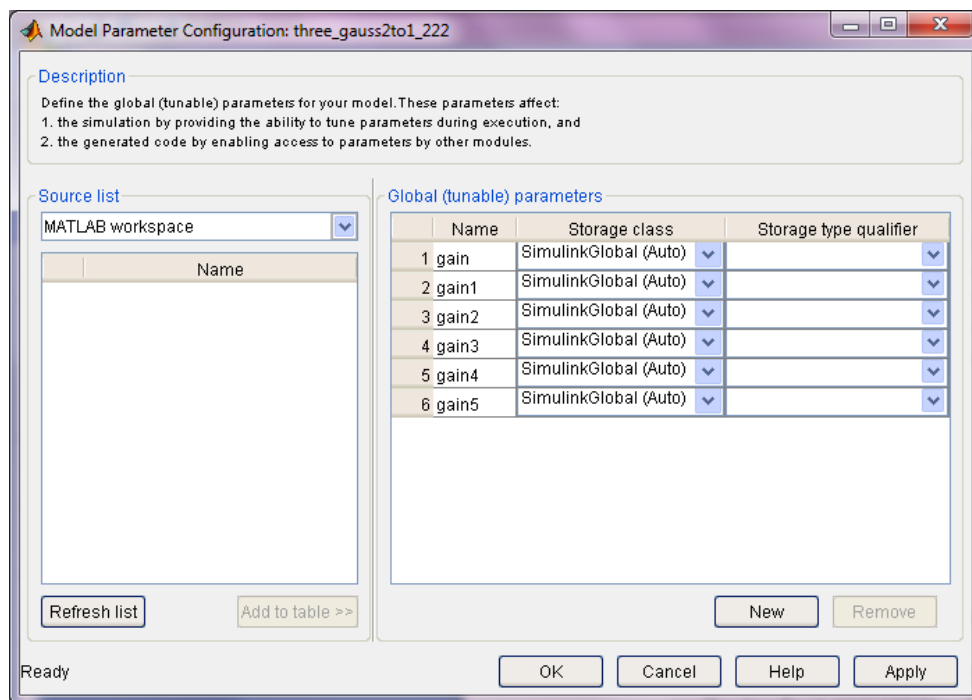


Figura 5.27. Selección de los bloques “Gain” al “Global (turnable) parameters”.

La ubicación del archivo “.dll” que se desea crear se configura en el apartado de MatSIM Options, donde se indica la ruta deseada.

Finalmente, en el apartado “Code Generation” se selecciona como “System target file” la opción “matsim.tlc”, y se hace click en la opción “Build” (Figura 5.23) para generar el archivo “.dll” necesario para trabajar con Simpack y cuya

implantación en dicho programa se describe en el punto anterior 4.3.5 de este documento.

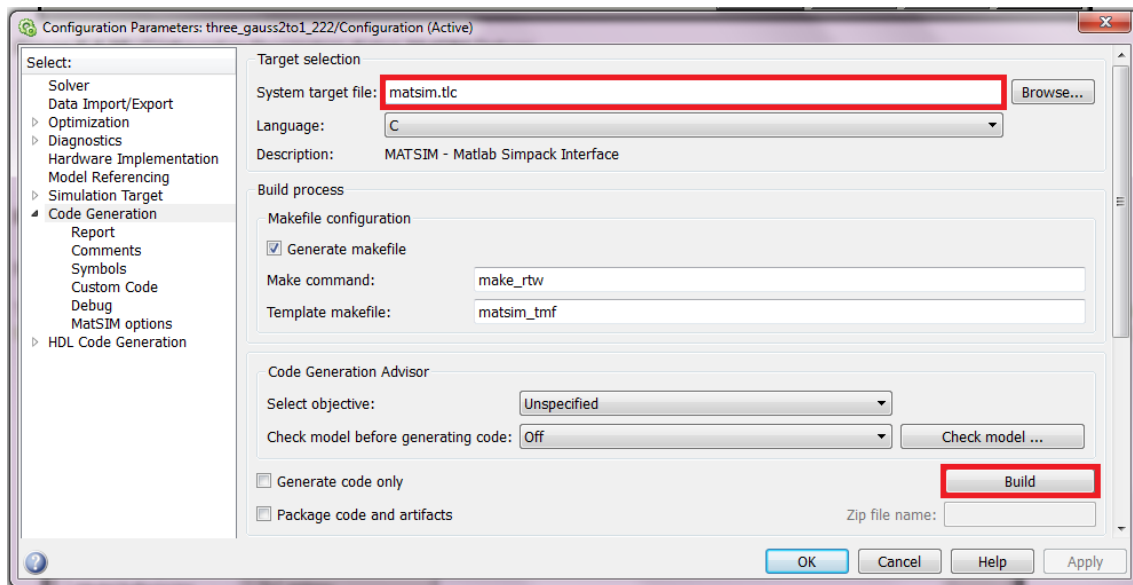


Figura 5.28. Configuración de “Code Generation” de Simulink.

Capítulo 6. Simulación y resultados

En este sexto capítulo se muestra el procedimiento para simular el modelo de vehículo ferroviario modelado en Simpack, así como el tipo de simulación realizada. También se indica la manera en la que se obtiene los resultados tras la simulación, mostrándose los mismos al final de este capítulo.

6.1 Simulación y obtención de los resultados

Una vez finalizado el modelo en Simpack del vehículo ferroviario, su simulación en el mismo resulta bastante sencilla. La principal herramienta de simulación que ofrece Simpack se denomina “Time Integration with measurements” y se encuentra en la barra de herramientas de la interfaz principal de Simpack (figura 6.1). Dicha herramienta es capaz de realizar todos los cálculos del movimiento del vehículo en la simulación y de mostrar todos y cada uno de los resultados numéricos obtenidos referidos a fuerzas, desplazamientos, velocidades, aceleraciones, señales de los sensores, etc, que aparecen en el vehículo a lo largo de la simulación.

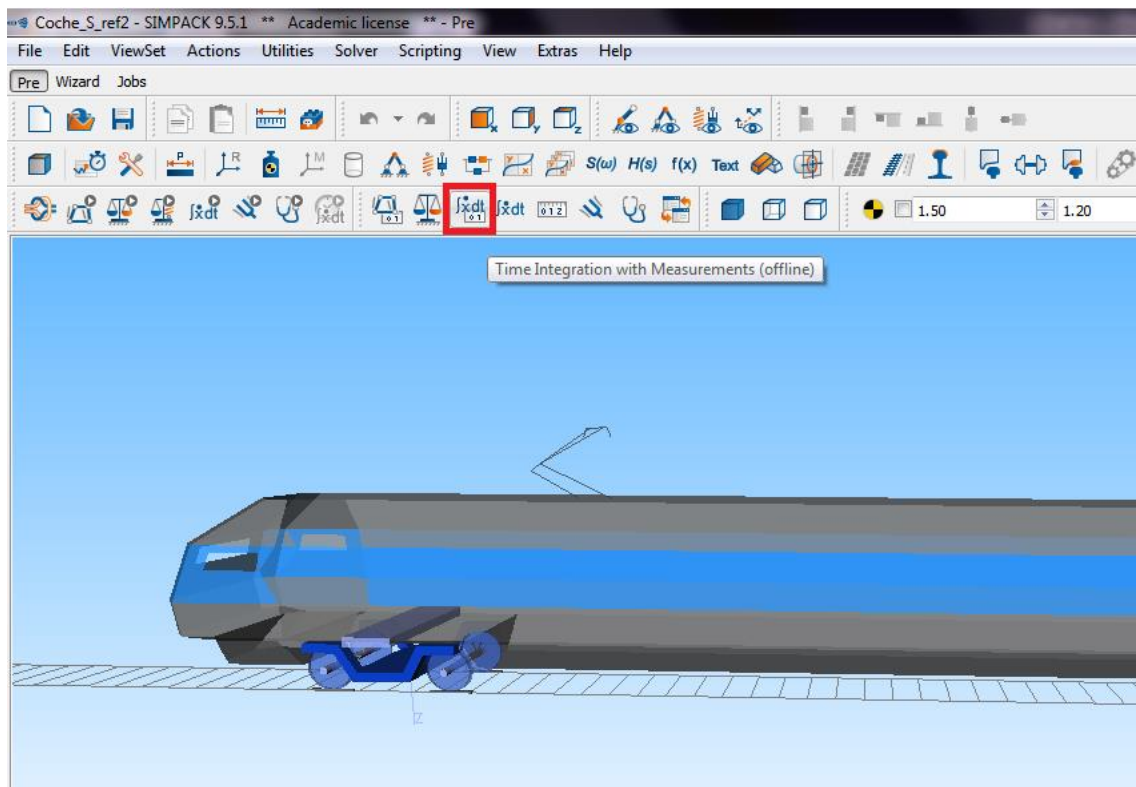


Figura 6.1. Botón de “Time Integration with measurements”.

La visualización de todos los resultados obtenidos en la simulación se realiza en el programa Simpack Post (software complementario de Simpack), el cual trabaja sobre el archivo “.sbr” que genera Simpack al utilizar la herramienta “Time Integration with measurements”.

De esta forma, al ejecutar Simpack Post y abrir el archivo “.sbr” generado por Simpack, se accede a interfaz principal donde en los desplegables de la parte derecha de la interfaz se tiene acceso a todos y cada uno de los resultados de la simulación.

Los resultados se muestran por defecto en gráficas cuya variable en el eje x es el tiempo, pudiendo mostrarse también en tablas con los valores numéricos exactos a lo largo del tiempo haciendo doble “click” sobre las gráficas y seleccionando la pestaña “info” (figura 6.2). Mediante Simpack Post se permite construir gráficas sobre los resultados obtenidos en la simulación para poder analizar el comportamiento del vehículo de manera sencilla e, incluso, compararlo con otros modelos.

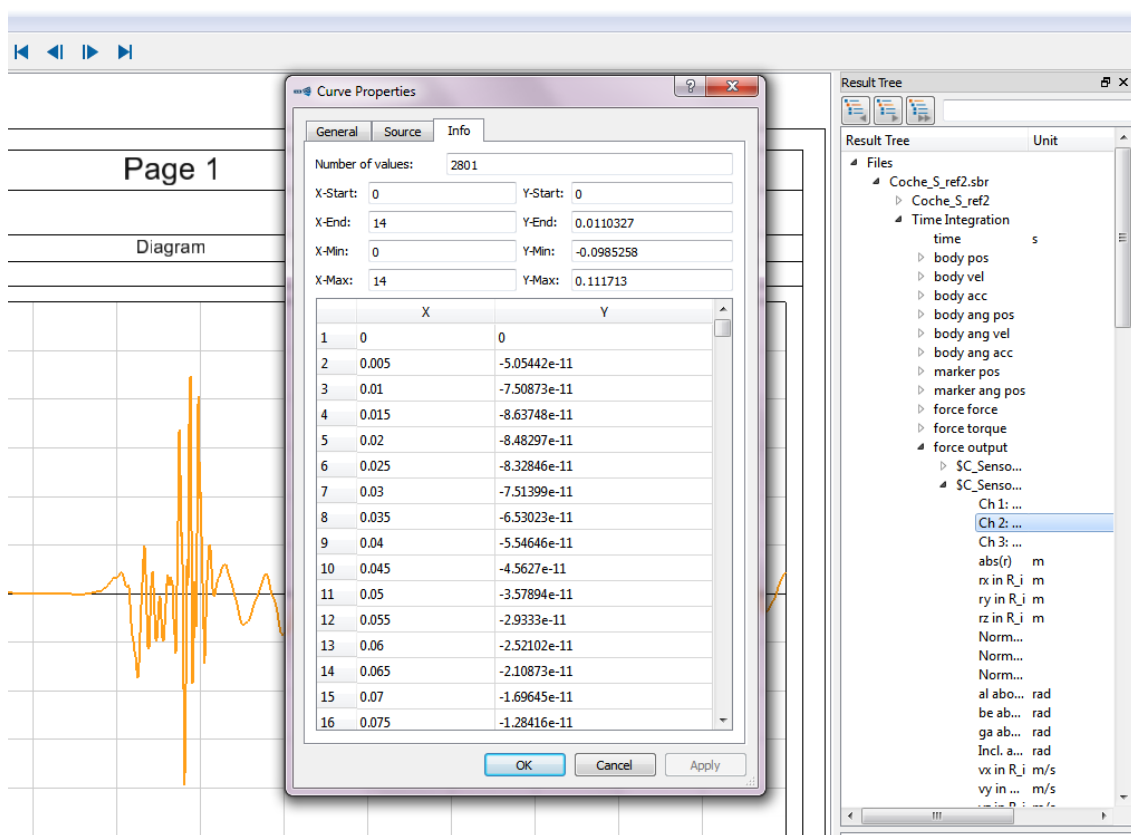


Figura 6.2. Acceso a la pestaña "info".

Existe también una segunda herramienta de simulación en Simpack denominada “Time Integration” (figura 6.3) que muestra en la interfaz de Simpack el movimiento del vehículo a lo largo del tiempo sin ofrecer ningún tipo de resultado más que dicho movimiento visual. Esta herramienta resulta muy útil, sobretodo antes de realizar complejas simulaciones que pueden dar como resultado el descarrilamiento del tren y, por lo tanto, dar resultados fallidos, ahorrando tiempo y cálculos innecesarios.

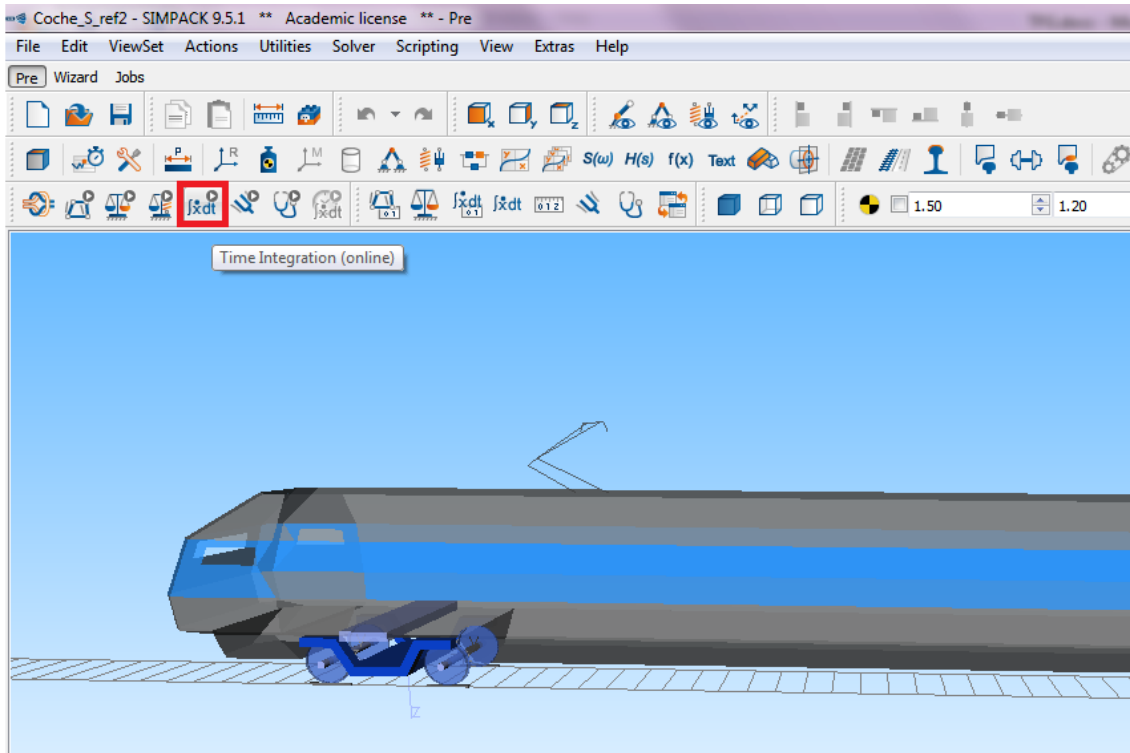


Figura 6.3. Botón de “Time Integration”.

6.2 Simulaciones realizadas

Las distintas simulaciones desarrolladas en Simpack se han realizado variando únicamente el tipo de vehículo ferroviario (provisto de suspensión activa o de suspensión convencional), manteniendo en todas las simulaciones una velocidad constante de 55 m/s (198 Km/h), y un trazado, con una irregularidad sinusoidal de amplitud 0.02 m, una frecuencia angular de 0.05 rad/m y una longitud de 100 m (mismo trazado que fue utilizado para establecer el valor de las ganancias de los bloques “Gain” del controlador en el punto 5.3 de este documento).

Como se puede observar, la irregularidad de la vía y la velocidad a la que se atraviesa son muy exigentes con el comportamiento dinámico del vehículo, buscándose en todo momento un caso muy desfavorable para garantizar un seguro comportamiento del controlador en condiciones normales.

La velocidad del vehículo se especifica mediante la herramienta “Vehicle Globals” de la interfaz principal de Simpack, tal y como se muestra en la figura 6.4.

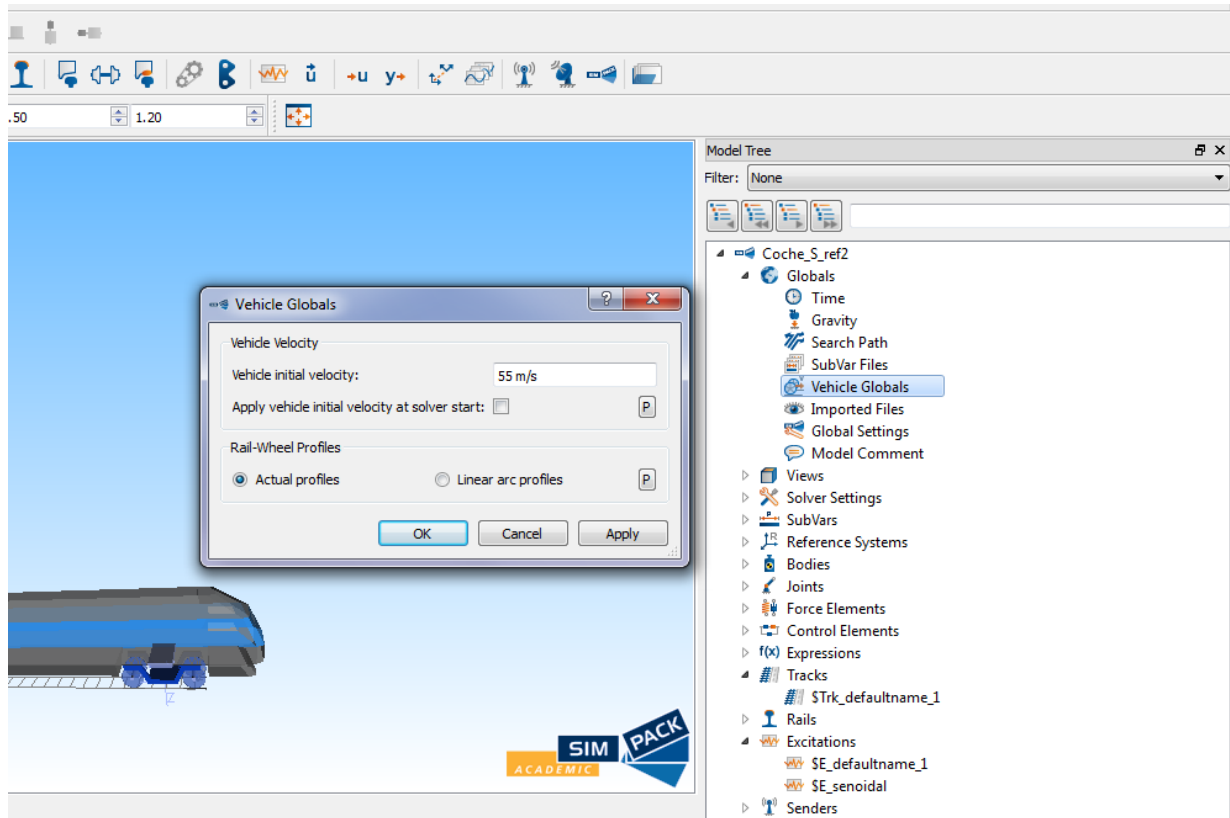


Figura 6.4. Configuración de la velocidad del vehículo.

Una vez especificada la velocidad del vehículo, se acude a la herramienta “Time Integration with measurements” descrita en el apartado anterior, y el software comenzará a realizar la simulación.

Cuando Simpack ha finalizado la simulación y generado el archivo “.sbr” correspondiente, ejecutando Simpack Post, se pueden visualizar los resultados de la simulación.

6.3 Resultados obtenidos

En este apartado se muestran los resultados obtenidos tras la simulación del vehículo ferroviario, tanto provisto de suspensión activa (gráficas de color rojo), como provisto de suspensión convencional (gráficas de color verde), y finalmente se compararán ambos casos para comprobar la efectividad del controlador desarrollado.

Los valores numéricos más relevantes tras realizar la simulación son los referidos al comportamiento del controlador, es decir, la posición relativa entre el bogie y el coche en el eje “y”, y la aceleración sufrida por el coche, sin olvidarse en ningún caso de otros valores de referencia importantes como la fuerza que ejercen los actuadores durante toda la simulación, o el desplazamiento global en el eje y que sufre el centro de gravedad del coche.

Tanto la posición relativa entre el bogie y el coche, como la aceleración sufrida por este último han de mejorar en el vehículo provisto de suspensión activa, o al menos, ese es el propósito para el que ha sido diseñado el controlador en el capítulo 5 de este documento.

En función de los resultados obtenidos para la posición relativa y la aceleración del coche en ambos tipos de vehículos, se puede comprobar si el funcionamiento del controlador de lógica borrosa es el correcto o no (apartado 6.3.3). Sin olvidar, en ningún, caso comprobar en todo momento que los valores de fuerza ejercidos por los actuadores son coherentes y admisibles.

6.3.1 Resultados del vehículo ferroviario provisto de suspensión pasiva

En este apartado, se muestran los resultados obtenidos en Simpack Post tras la simulación del vehículo ferroviario, provisto de suspensión secundaria lateral pasiva, de la posición relativa entre el bogie y el coche, de la aceleración lateral sufrida por el coche respecto al bogie, y de la posición del centro de gravedad del vehículo (CDG) en el eje Y.

- **Posición relativa entre bogie y coche en el eje Y (figuras 6.5 y 6.6):** en las siguientes figuras se muestra el desplazamiento transversal del bogie (dirección del eje Y) respecto a su posición centrada, tanto para el bogie delantero, como para el trasero.

- Bogie delantero → Valores límite: 0,0196 m y -0,0185 m.



Figura 6.5. Posición relativa del bogie delantero con respecto al coche en el eje Y a lo largo del tiempo, del vehículo provisto de suspensión pasiva.

- Bogie trasero → Valores límite: 0,0059 m y -0,0118 m.



Figura 6.6. Posición relativa del bogie trasero con respecto al coche en el eje Y a lo largo del tiempo, del vehículo provisto de suspensión pasiva.

➤ **Aceleración del coche respecto del bogie (figuras 6.7 y 6.8):** en las siguientes figuras aparece la aceleración lateral sufrida por el coche con respecto al bogie, tanto respecto al bogie delantero, como al bogie trasero.

- Bogie delantero → Valores límite: $5,51 \text{ m/s}^2$ y $-7,97 \text{ m/s}^2$.



Figura 6.7. Aceleración en el eje Y que sufre el coche provisto de suspensión pasiva en su parte delantera a lo largo del tiempo.

- Bogie trasero → Valores límite: $39,32 \text{ m/s}^2$ y $-35,12 \text{ m/s}^2$.

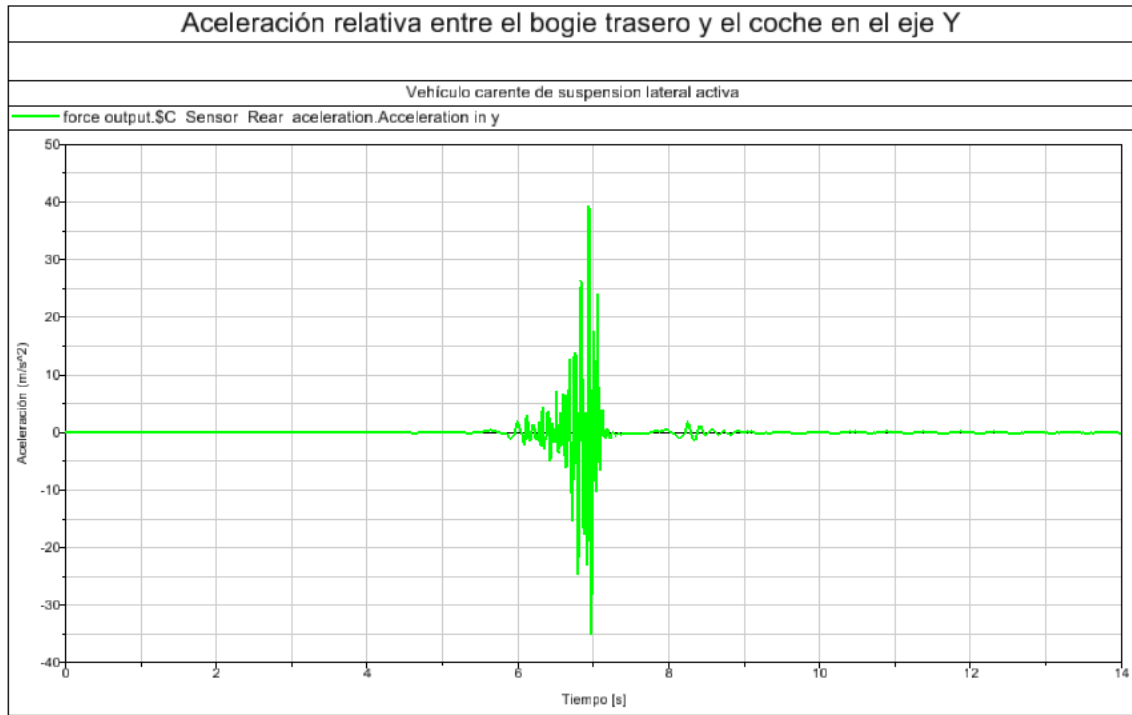


Figura 6.8. Aceleración en el eje Y que sufre el coche provisto de suspensión pasiva en su parte trasera a lo largo del tiempo.

- **Posición en ejes globales del CDG del coche en el eje Y (figura 6.9):** se muestra la variación de la posición del centro de gravedad del vehículo ferroviario (CDG) en el eje Y a largo del tiempo, obteniéndose como valores límite en dicha medición 0,0107 m y -0,0147 m.

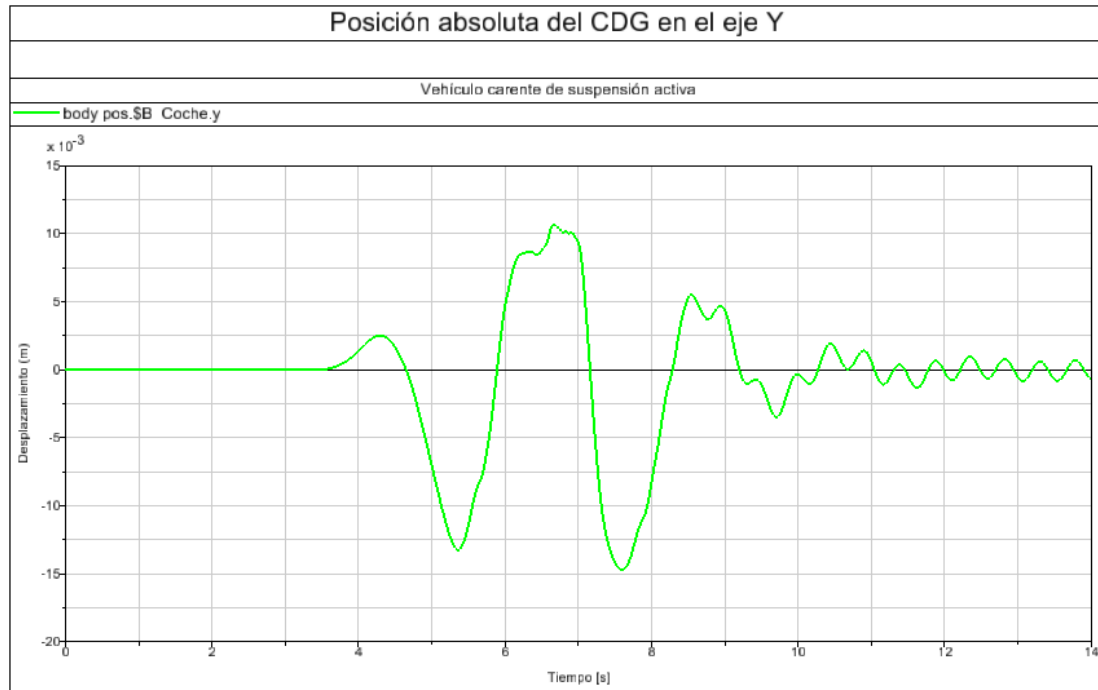


Figura 6.9. Posición en ejes globales del CDG del coche en el eje Y a lo largo del tiempo.

6.3.2 Resultados del vehículo ferroviario provisto de suspensión activa

En este apartado, se muestran los resultados obtenidos en Simpack Post tras la simulación del vehículo ferroviario, provisto de suspensión secundaria lateral activa, de la posición relativa entre el bogie y el coche, la aceleración lateral sufrida por el coche con respecto al bogie, la posición del centro de gravedad del vehículo (CDG) en el eje Y, y, por último, la fuerza ejercida por lo actuadores.

- **Posición relativa entre el bogie y el coche en el eje Y (figuras 6.10 y 6.11):** en las siguientes figuras se muestra el desplazamiento transversal del bogie (dirección del eje Y) respecto a su posición centrada, tanto para el bogie delantero, como para el trasero.

- Bogie delantero → Valores límite: 0,0154 m y -0,009 m.



Figura 6.10. Posición relativa del bogie delantero con respecto al coche en el eje Y a lo largo del tiempo, del vehículo provisto de suspensión activa.

- Bogie trasero → Valores límite: 0,007 m y -0,0081 m.



Figura 6.11. Posición relativa del bogie trasero con respecto al coche en el eje Y a lo largo del tiempo, del vehículo provisto de suspensión activa.

➤ **Aceleración del coche respecto del bogie (figuras 6.12 y 6.12):** en las siguientes figuras aparece la aceleración lateral sufrida por el coche con respecto al bogie, tanto respecto al bogie delantero, como al bogie trasero.

- Bogie delantero → Valores límite: $8,16 \text{ m/s}^2$ y $-6,41 \text{ m/s}^2$.

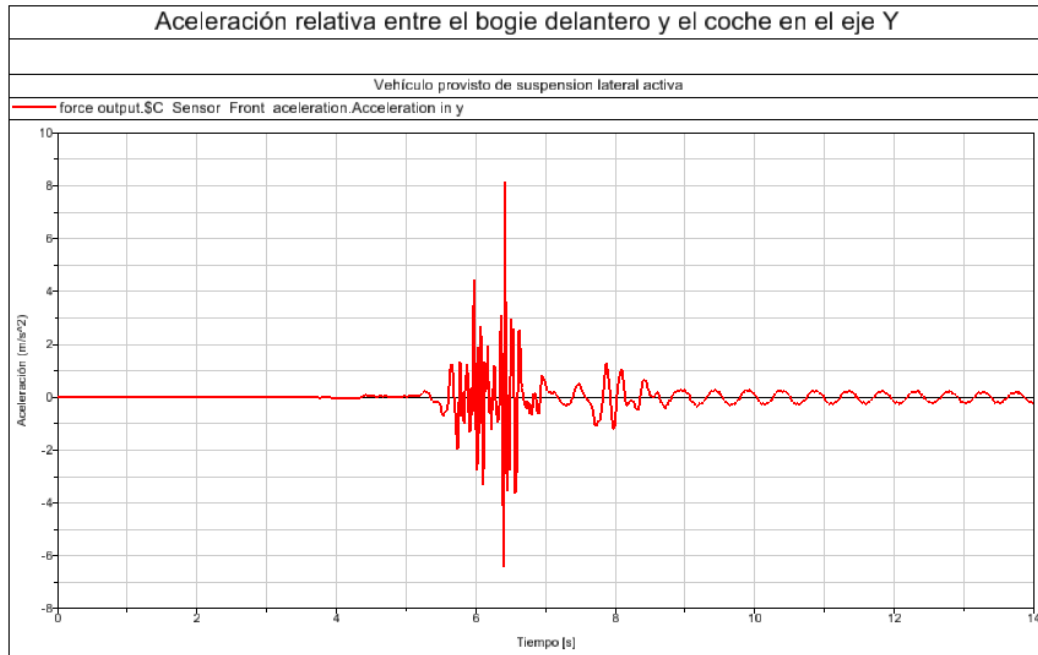


Figura 6.12. Aceleración en el eje Y que sufre el coche provisto de suspensión activa en su parte delantera.

- Bogie trasero → Valores límite: $15,92 \text{ m/s}^2$ y $-15,96 \text{ m/s}^2$.

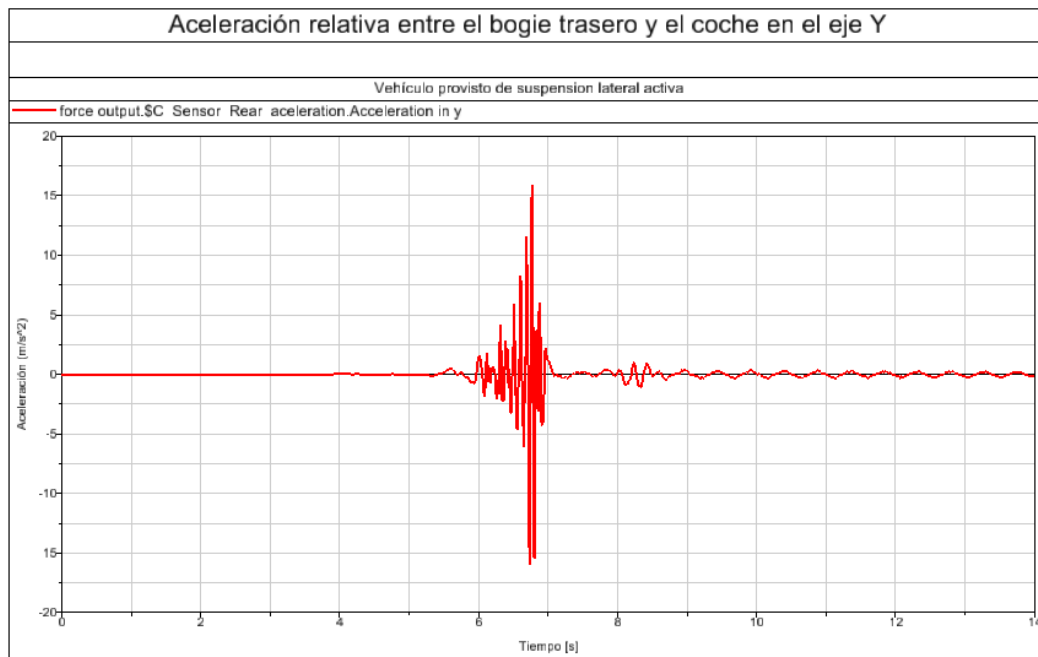


Figura 6.13. Aceleración en el eje Y que sufre el coche provisto de suspensión activa en su parte trasera a lo largo del tiempo.

➤ **Fuerza de los actuadores (figuras 6.14 y 6.15):** en las siguientes figuras se muestra el valor de la fuerza ejercida por un sólo actuador, tanto situado en el bogie delantero, como situado en el bogie trasero, a lo largo del tiempo. Es importante recordar que cada uno de los bogies dispone de dos actuadores, ejerciendo la misma fuerza cada uno de ellos.

- Bogie delantero → Valores límite: 2644,48 N y -3963,64 N.



Figura 6.14. Fuerza ejercida por los actuadores en el bogie delantero a lo largo del tiempo.

- Bogie trasero → Valores límite: 3767,43 N y -2797,28 N.

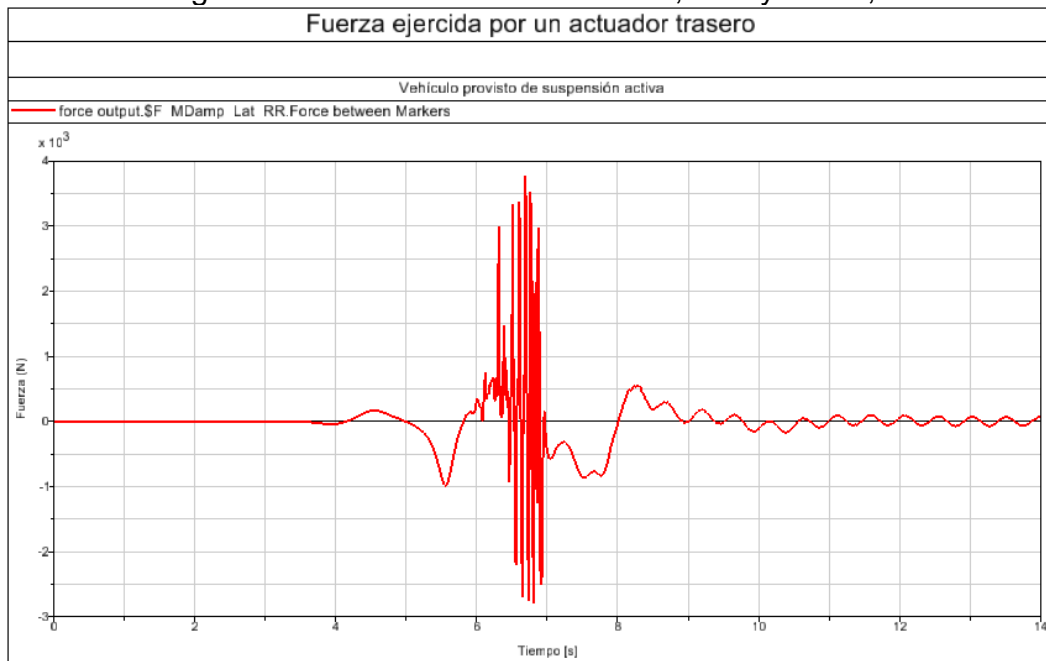


Figura 6.15. Fuerza ejercida por los actuadores en el bogie trasero a lo largo del tiempo.

- **Posición en ejes globales del CDG del coche en el eje Y (figura 6.16):** se muestra la variación de la posición del centro de gravedad del vehículo ferroviario (CDG) en el eje Y a largo del tiempo, obteniéndose como valores límite en dicha medición 0,0087 m y -0,0124 m.

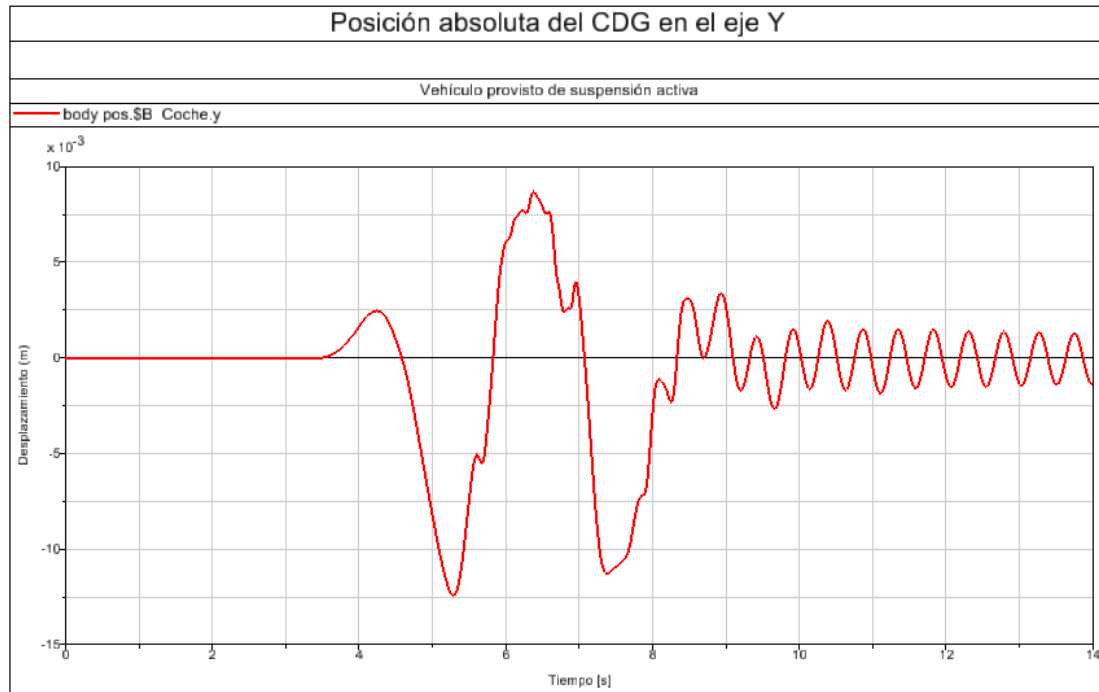


Figura 6.16. Posición en ejes globales del CDG del coche en el eje Y a lo largo del tiempo.

6.3.3 Comparación entre los resultados obtenidos con suspensión convencional y suspensión activa

A continuación, en las gráficas que aparecen en las siguientes figuras, 6.17, 6.18, 6.19, 6.20 y 6.21, se exponen los resultados obtenidos en las distintas mediciones dinámicas, comparando en todo momento, el vehículo provisto de suspensión lateral pasiva (gráficas de color verde), con el vehículo provisto de suspensión lateral activa (gráficas de color rojo). De esta forma, resulta sencillo poder comparar visualmente mediante las gráficas, el efecto del controlador de lógica difusa en la dinámica del vehículo. Los valores límites obtenidos en cada una de las mediciones, tanto del vehículo provisto de suspensión activa, como del provisto de suspensión pasiva, están recogidas en la tabla 7.1 del capítulo 7.

- **Posición relativa entre bogie y coche en el eje Y (figuras 6.17 y 6.18):** en las siguientes figuras se muestra el desplazamiento transversal del bogie (dirección del eje Y) respecto a su posición centrada, tanto

para el bogie delantero, como para el trasero, en ambos tipos de vehículos.

- Bogie delantero.



Figura 6.17. Comparación entre suspensión activa y suspensión pasiva, de la posición relativa del bogie delantero con respecto al coche en el eje Y a lo largo del tiempo.

- Bogie trasero.

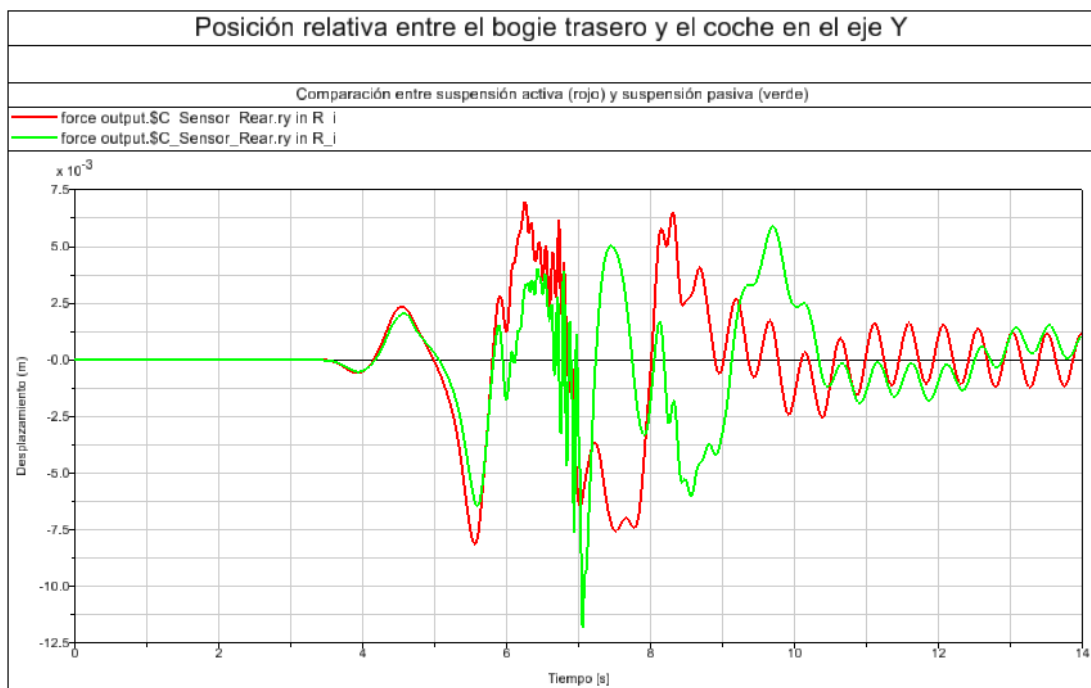


Figura 6.18. Comparación entre suspensión activa y suspensión pasiva, de la posición relativa del bogie trasero con respecto al coche en el eje Y a lo largo del tiempo.

➤ **Aceleración del coche respecto del bogie (figuras 6.19 y 6.20):** en las siguientes figuras aparece la aceleración lateral sufrida, en ambos vehículos, por el coche con respecto al bogie, tanto respecto al bogie delantero, como al bogie trasero.

- Bogie delantero.

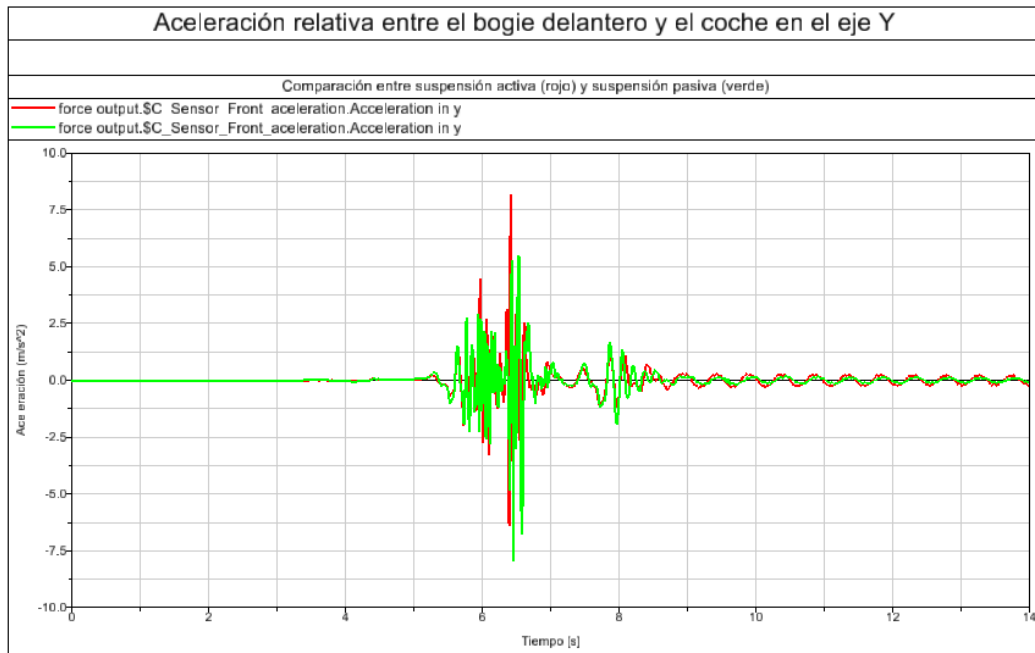


Figura 6.19. Comparación entre suspensión activa y suspensión pasiva, de la aceleración en el eje Y del coche en su parte delantera, a lo largo del tiempo.

- Bogie trasero.

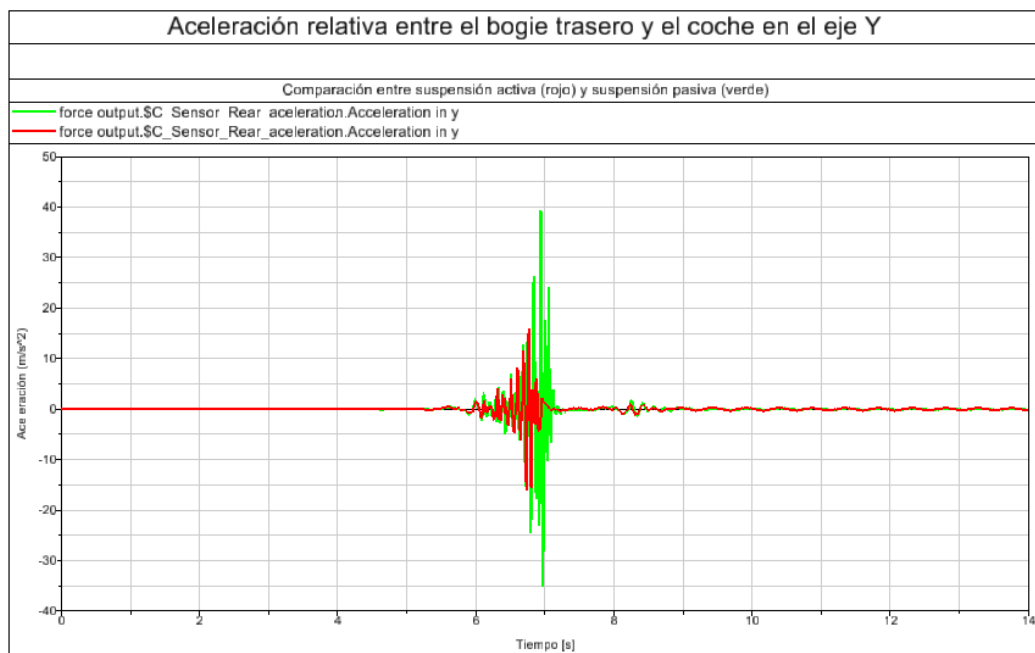


Figura 6.20. Comparación entre suspensión activa y suspensión pasiva, de la aceleración en el eje Y del coche en su parte trasera, a lo largo del tiempo.

- **Posición en ejes globales del CDG del coche en el eje Y (figura 6.21):** se muestra la variación de la posición del centro de gravedad de ambos vehículos ferroviarios (CDG) en el eje Y a largo del tiempo.

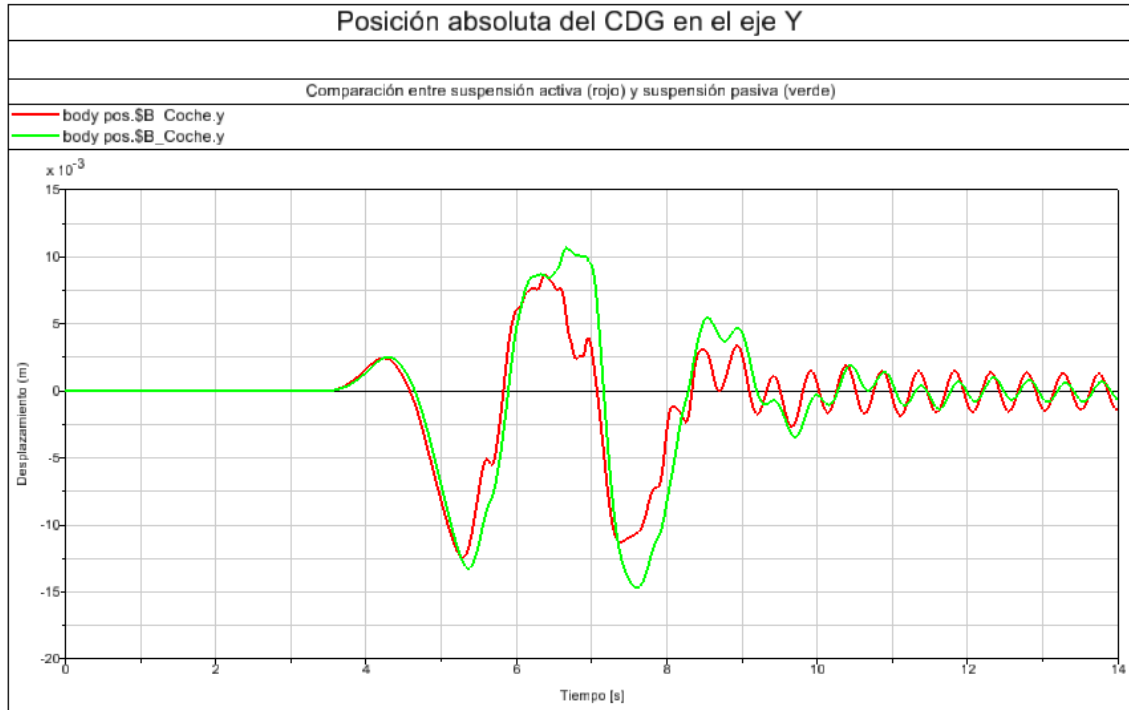


Figura 6.21. Comparación de la posición en ejes globales del CDG del coche en el eje Y a lo largo del tiempo, del vehículo provisto de suspensión activa frente al provisto de suspensión pasiva.

Capítulo 7. Conclusiones y trabajos futuros

7.1 Conclusiones

Tras todas las simulaciones realizadas tanto del vehículo provisto de suspensión activa, como del provisto de suspensión convencional se puede obtener una conclusión sobre el funcionamiento del controlador de la suspensión lateral desarrollado en función de los datos obtenidos.

En la tabla 7.1 se muestran los valores límites alcanzados durante la simulación en módulo, referidos a la posición relativa entre el bogie y el coche en el eje Y, la aceleración lateral sufrida por el coche, y la posición global sobre el eje Y del centro de gravedad del coche.

Tabla 7.1. Valores límite alcanzados en la simulación.

	Tipo de vehículo	Posición relativa en el eje Y (m)	Aceleración en el eje Y del coche (m/s^2)	Posición CDG del coche en el eje Y (m)
Bogie delantero	Suspensión convencional	0,0196	7,97	-
	Suspensión activa	0,0154	8,16	-
Bogie trasero	Suspensión convencional	0,0118	39,32	-
	Suspensión activa	0,0081	15,97	-
CDG del coche	Suspensión convencional	-	-	0,0147
	Suspensión activa	-	-	0,0124

Debe hacerse hincapié nuevamente, en que los valores mostrados en la tabla x están en valor absoluto, luego son tanto los máximos como los mínimos obtenidos en las gráficas de Simpack Post.

Como se puede observar en la tabla 7.1, la disminución, tanto en el bogie delantero como en el trasero del desplazamiento relativo en el eje Y del bogie con respecto al coche, es notable, siendo su valor máximo de 0,00419 m. Por otra parte, la aceleración lateral sufrida en la parte delantera del coche aumenta muy ligeramente en el vehículo provisto de suspensión activa, pero sin embargo disminuye, drásticamente, en más de un 50 % en la parte trasera del coche provisto de suspensión activa, respecto al que monta suspensiones convencionales.

En cuanto a la posición del CDG del coche en el eje Y, se puede observar que también disminuye ligeramente en el vehículo provisto de suspensiones activas, en parte, debido a que la posición relativa entre el bogie y el coche en el eje Y también disminuye.

Por último, los valores absolutos de fuerza ejercida mediante los actuadores se muestran en la tabla 7.2 y, como se puede observar, sus valores están dentro de los estándares de este tipo de elementos. Se ha de recordar que cada bogie del vehículo va provisto de dos actuadores.

Tabla 7.2. Fuerza máxima por cada actuador.

Bogie	Fuerza máx. por cada actuador (N)
Delantero	3963,64
Trasero	3767,43

Por lo tanto, en vista de los resultados mostrados, se puede decir que el funcionamiento del controlador de la suspensión activa del vehículo funciona correctamente, cumple su misión en mayor o menor medida de mantener el desplazamiento relativo en el eje Y entre el bogie y el coche al mínimo, y de disminuir las aceleraciones laterales sufridas por el coche en la medida de lo posible, sin provocar para ello fuerzas desmesuradas en los actuadores del vehículo ferroviario.

7.2 Trabajos futuros

Partiendo de la base que facilita el presente documento, se pueden plantear una serie de trabajos como:

- Realizar un ajuste más fino y preciso de todos los parámetros, tanto del controlador como de la suspensión del vehículo ferroviario, para conseguir un funcionamiento de éste lo más óptimo posible, para lo cual, se debe realizar un gran número de simulaciones hasta conseguir la configuración más eficiente con la dinámica del vehículo. Si bien es cierto que hay que tener en cuenta que la optimización del controlador y de la suspensión del vehículo siempre va a ser susceptible de mejora, por pequeña que ésta sea.
- Desarrollar un controlador de la suspensión activa vertical de un vehículo ferroviario basándose en gran medida, en los conceptos aplicados para el desarrollo del controlador de la suspensión activa lateral que se muestran en este documento.
- Desarrollar un controlador de suspensión lateral semi activa, cuya efectividad dinámica sería menor al de una suspensión completamente activa pero resultaría más económico.
- Plantear un modelo de controlador enfocado al confort de los pasajeros, y no tanto en otros factores de la dinámica del vehículo como reducir el

desplazamiento lateral relativo entre el bogie y el coche, o mejorar el paso por curva del mismo.

Bibliografía

- [1] Ingeniería ferroviaria. Tomo 1. Autor: Profesor Doctor Ingeniero Julio Álvarez Rodríguez.
- [2] Ingeniería ferroviaria. Tomo 2. Autor: Profesor Doctor Ingeniero Julio Álvarez Rodríguez.
- [3] Lofti A. Zadeh y la lógica borrosa Por M^a Teresa Giménez Barbat
- [4] Manual de ayuda de Simpack.
- [5] Ferrocarriles: ingeniería e infraestructura de los transportes. Escrito por Daniel Álvarez Mántaras, Pablo Luque Rodríguez.
- [6] Evolution business and tecnology magazine from SFK.
- [7] El tren de rodaje en los vehículos ferroviarios. Autor Antonio Baamonde Roca.
- [8] Tesis doctoral. Estudio de la creación, desarrollo y método de grietas en ruedas ferroviarias. Autor: Belén Molina Sánchez. Universidad Politécnica de Madrid.
- [9] PFC. Estudio de la defectología en ruedas ferroviarias. Autor: Arturo Herreros Garrido. Uiversidad Carlos III de Madrid.
- [10] Tesis doctoral. Modelado y simulación del comportamiento dinámico a baja frecuencia de trenes articulados. Autor: Javier Carballeira Morado. Universidad Politécnica de Valencia.
- [11] Nippon Steel & Sumitomo Metal Technical Report No. 105 December 2013, autor: Osamu Goto.
- [12] Towards Active Car Body Suspension in Railway Vehicles. Autor: Jessica Fagerlund. University of Technology Göteborg, Sweden.
- [13] Comparative research on semi-active control strategies for magneto-rheological suspension. Xiao-min Dong, Miao Yu, Chang-rong Liao, y Wei-min Chen.
- [14] Documentación de la asignatura de ferrocarriles impartida en la Universidad Carlos III en el Grado en Ingeniería Mecánica.
- [15] Manual de Simulink. <http://es.slideshare.net/cosococo/manual-simulink>
- [16] Normativa. <http://www.aenor.es>

[17] Diseño de un eje (UNE-EN 13103) y modelado con POR-E: Aplicación a un eje ferroviario. Autor: Mario Casillas Guillermo, Universidad Carlos III de Madrid.

[18] Control mediante lógica difusa. Autores: Samir Kouro R. y Rodrigo Musalem M.

[19] Dynamic modeling and fuzzy logic control of vibrations of a railway vehicle for different track irregularities. Autores: Semih Sezer y Ali Erdem Atalay. Department of Mechanical Engineering, Yildiz Technical University, Besiktas, Istanbul, Turkey.

